

Федеральное агентство научных организаций
Институт водных проблем Российской академии наук

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ
ИНСТИТУТА ВОДНЫХ
ПРОБЛЕМ РАН

1967–2017

Том 1

Москва
КУРС
2017

Ответственный редактор – доктор физико-математических наук А.Н. Гельфан
Составитель – кандидат технических наук М.И. Степанова

Избранные труды Института водных проблем РАН: 1967–2017: В 2 т. –
М., КУРС, 2017. – Т. 1. – 640 с.

ISBN 978-5-906923-75-2 (КУРС)

ISBN 978-5-906923-76-9 (КУРС, общ.)

Первый том посвящён памяти ушедших из жизни выдающихся учёных, работавших в разное время в Институте водных проблем: А.Б. Авакяна, Ю.А. Александровского, Г.М. Баренбойма, Е.Г. Блохинова, А.И. Будаговского, С.Л. Вендрова, А.Н. Вознесенского, Г.В. Воропаева, Ю.С. Дологова, Л.В. Дунина-Барковского, В.С. Залетаева, И.С. Зекцера, Г.П. Калинина, В.С. Ковалевского, Д.В. Коренистова, С.Н. Крицкого, Б.И. Куделина, В.Н. Кунина, М.Ф. Менкеля, В.И. Найдёнова, М.Р. Никитина, Г.Н. Панина, В.Г. Пряжинской, Д.Я. Ратковича, К.И. Россинского, Б.А. Фидмана, М.Г. Хубляряна, Л.О. Эйнора – учёных, чьи труды создали репутацию Института, как одного из ведущих научных учреждений страны. Он содержит биографии перечисленных выше учёных, а также избранные труды, опубликованные после 1967 года – года создания ИВП РАН.

ISBN 978-5-906923-75-2 (КУРС)

ISBN 978-5-906923-76-9 (КУРС, общ.)

© Коллектив авторов, 2017

© Институт водных проблем РАН, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ: создание Института, его развитие и современный портрет а (1967–2017 годы)	5
<i>Авакян Артавазд Бабкенович</i>	19
Исследование водохранилищ и их воздействия на окружающую среду	23
Наводнения. Концепция защиты.	52
<i>Александровский Юрий Владимирович</i>	67
<i>Баренбойм Григорий Матвеевич</i>	70
Ксенобиотики с лекарственной активностью – новая угроза для окружающей среды	75
<i>Блохинов Евгений Георгиевич</i>	91
Усеченные распределения вероятностей для расчета максимального стока рек	93
<i>Будаговский Анатолий Иванович</i>	122
Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова	125
<i>Вендров Семён Леонидович</i>	143
Ресурсы поверхностных вод и их использование	147
<i>Вознесенский Андрей Николаевич</i>	167
<i>Воротаев Григорий Васильевич</i>	170
Некоторые вопросы управления использованием водных ресурсов	176
Основные направления научных исследований в области водообеспечения	187
<i>Долотов Юрий Сергеевич</i>	203
Исследование термогидродинамических процессов и полей прибрежной зоны и эстуариев Белого моря	206
<i>Дунин-Барковский Лев Валерианович</i>	226
<i>Залетаев Владимир Сергеевич</i>	229
Структурная организация экотонов в контексте управления.	232
<i>Зекцер Игорь Семёнович</i>	258
Современное состояние региональных исследований пресных подземных вод	263
<i>Калинин Геннадий Павлович</i>	281
От аэрокосмических снимков к прогнозам и расчетам стока	286
<i>Ковалевский Владимир Серафимович</i>	329
О взаимосвязанности уровней подземных вод соседних лет	331

<i>Коренистов Дмитрий Васильевич</i>	336
Проблемы теории регулирования стока	340
<i>Крицкий Сергей Николаевич</i>	383
<i>Асарин А.Е., Сотникова Л.Ф.</i> Сергей Николаевич Крицкий – один из основных создателей стохастической гидрологии и теории управления речным стоком (к 110-й годовщине со дня рождения)	383
О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов	396
<i>Куделин Борис Иванович</i>	429
Основные направления изучения подземного стока	431
<i>Кунин Владимир Николаевич</i>	442
Подземные воды и окружающая среда	446
<i>Менкель Михаил Фёдорович</i>	459
<i>Найдёнов Вячеслав Иосифович</i>	463
Хаотическая динамика гидросферы и климата	466
<i>Никитин Михаил Ростиславович</i>	476
Солоноватые и соленые подземные воды как составляющая общих водных ресурсов Советского Союза и задачи их изучения	478
<i>Панин Геннадий Николаевич</i>	490
Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий.	493
<i>Пряжинская Валентина Гавриловна</i>	522
Методическая поддержка решений по управлению качеством природных вод	525
<i>Раткович Даниил Яковлевич</i>	545
Актуальные проблемы стохастической гидрологии	550
<i>Россинский Кирилл Илиодорович</i>	573
Термический режим и ледяной покров на водоемах и водотоках	577
<i>Фидман Борис Александрович</i>	586
О превращениях энергии в турбулентном потоке жидкости, несущем тяжелые взвешенные частицы	589
<i>Хубларян Мартин Гайкович</i>	599
Водные проблемы в XXI веке	603
<i>Эйнояр Леонард Ольгердович</i>	614
Ботаническая площадка – биоинженерное сооружение для доочистки сточных вод	617

ВВЕДЕНИЕ: создание Института, его развитие и современный портрет (1967–2017 годы)

К 1960-м гг. вовлечённость водных ресурсов в отечественную экономику, антропогенные изменения естественного режима и качества вод суши достигли таких масштабов, что обеспечение водной безопасности с учётом происходящих и прогнозируемых изменений, повышение эффективности управления водными ресурсами, охраны вод стали рассматриваться как важнейшие факторы развития страны.

В то время фундаментальная наука о водных ресурсах была представлена в Академии наук СССР отделом гидрологии Института географии АН СССР и весьма малочисленным Советом по проблемам водного хозяйства. В начале 1967 г. по поручению ЦК КПСС Госплан СССР, Госкомитет по науке и технике, Академия наук СССР, Госстрой СССР, Министерство сельского хозяйства СССР, Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР, Министерство энергетики и электрификации СССР, Всесоюзная академия сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина на совместном заседании в Совете Министров СССР рассмотрели вопрос о целесообразности создания в Академии наук СССР института, ориентированного на фундаментальные исследования вод суши.

Институт был создан распоряжением Совмина СССР от 24 ноября 1967 г. №2726 р и постановлением Президиума Академии наук СССР от 29 декабря 1967 г. №977 как Институт водных проблем Академии наук СССР (ИВП АН СССР).

В решении Президиума АН СССР основная задача Института водных проблем АН СССР была определена как «комплексная оценка водных ресурсов и разработка научных основ оптимального использования водных ресурсов», а также сформулированы основные направления научной деятельности Института:

- водные ресурсы, водный баланс и его преобразование под влиянием хозяйственной деятельности;
- закономерности режима вод суши и гидрофизических процессов, прогнозы их изменения и методы управления ими;

СОВЕТ МИНИСТРОВ СССР

О целесообразности создания
Института водных проблем

Поручение ЦК КПСС
от 16 июня 1966 г.

..... В настоящее время состояние научных исследований в области водного хозяйства является неудовлетворительным. Имеется большое число отраслевых научно-исследовательских организаций, занимающихся отдельными относительно узкими проблемами и отраслевыми вопросами, но нет единого высоко авторитетного научного центра, который рассматривал бы и решал проблемы научно-хозяйственной оценки водных ресурсов в целом и их комплексного использования с максимальным учетом интересов всех отраслей водного хозяйства, с научным прогнозом отдаленной перспективы.

.....

На основании изложенного мы приходим к выводу о крайней необходимости создания в Академии наук СССР Института водных проблем, как базового научного учреждения этого направления, задачей которого должно явиться проведение фундаментальных научных исследований в области оценки водных ресурсов и их оптимального использования, разработка научных основ перспективного водохозяйственного баланса СССР, разработка проблем экономики водного хозяйства и проведение технико-экономических исследований основных проблем в этой области.

.....

Н. Байков
В. Кириллин
М. Келдыш
И. Новиков
В. Мацкевич
В. Алексеевский
П. Непорожний
А. Аскаоченский

Выписка из решения заседания Совмина СССР по вопросу «О целесообразности создания Института водных проблем (апрель 1967 г.)»

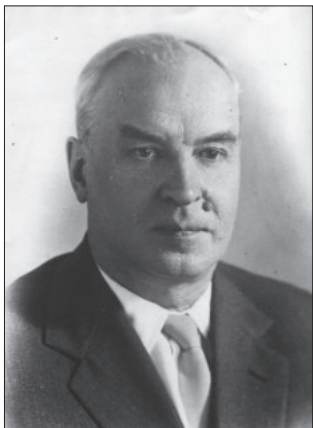
- научные основы принципиальной схемы рационального использования водных ресурсов и общих требований по охране вод от загрязнения;
- научные основы динамических водохозяйственных балансов и важнейших региональных водохозяйственных проблем;

- прогноз изменения природных факторов в результате водохозяйственных мероприятий; научные проблемы экономики водного хозяйства.

Институту водных проблем АН СССР передавался Совет по проблемам водного хозяйства Академии наук СССР, а также лаборатория водохозяйственных проблем Государственного гидрологического института в г. Москве.

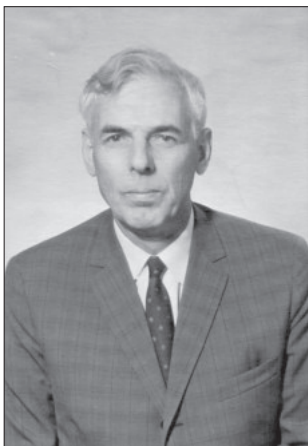
Первым директором ИВП АН СССР был назначен Андрей Николаевич Вознесенский – крупнейший учёный-гидротехник, известный специалист в области комплексного использования водных ресурсов, доктор технических наук, профессор, «Заслуженный деятель науки и техники Узбекской ССР».

Возглавляя Институт в 1967–73 гг., А.Н. Вознесенский провёл огромную работу по формированию научного коллектива, привлечению к работе высококвалифицированных научных кадров. Андрей Николаевич пригласил в Институт выдающихся отечественных учёных, а также молодых в то время специалистов, которые стали в будущем крупными учёными: в области управления водными ресурсами и рационального водопользования (д.г.н. С.Л. Вендров, д.г.н. А.Б. Авакян, д.т.н. Г.В. Воропаев, д.г.н. Л.В. Дунин-Барковский, д.г.н. В.Н. Кунин), в области физической гидрологии и гидродинамики (д.г.н., проф. Г.П. Калинин, д.г.н. А.И. Будаговский, д.т.н.



Андрей Николаевич Вознесенский – первый директор Института (1967–73 гг.)

К.И. Россинский, д.т.н. Б.А. Фидман), в области гидрогеологии (д.г.-м.н., проф. Б.И. Куделин; д.т.н., проф. С.Л. Миркин; д.г.-м.н., проф. М.Р. Никитин), в области стохастической гидрологии и регулирования стока (д.т.н. С.Н. Крицкий, д.т.н. М.Ф. Менкель, д.т.н. Ю.В. Александровский, к.т.н. Е.Г. Блохинов, д.т.н. Д.Я. Раткович, Д.В. Коренистов) и других. Значительная роль в развитии Института в первый период его деятельности принадлежит чл.-корр. АН СССР Г.П. Калинин (работал в Институте в 1968–75 гг.). Биографии и статьи большинства пере-



Владимир Николаевич Кунин – директор Института в период 1973–76 гг.

численных выдающихся учёных помещены в эту монографию.

В 1973–76 гг. Институт возглавлял Владимир Николаевич Кунин – доктор географических наук, профессор, «Заслуженный деятель науки Туркменской ССР», чл.-корр. Академии наук СССР и Туркменской ССР. Вместе с коллегами А.Н. Вознесенским, Г.П. Калининым, Б.И. Куделиным Владимир Николаевич был одним из организаторов Института и проделал огромную работу по формированию его научной деятельности. В.Н. Кунин – крупнейший учёный, специалист в области изучения закономерностей взаимодействия под-

земных и поверхностных вод, геоморфологии, освоения местных водных ресурсов пустынь, гидрогеологии и палеогеографии аридной зоны. Он по праву считается одним из основоположников учения о подземных водах пустынь.

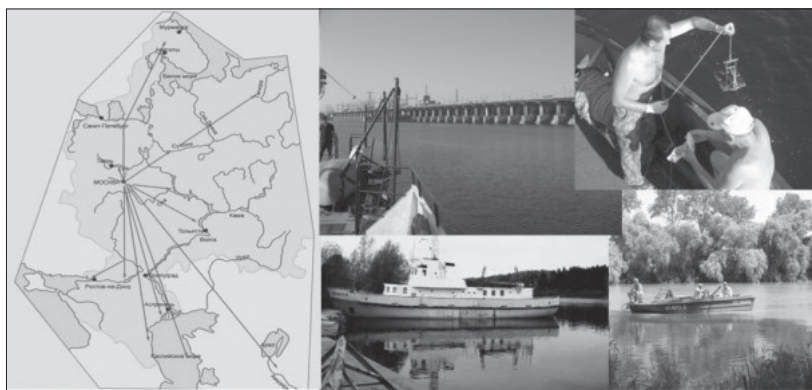
В 1976 г. директором Института был избран Григорий Васильевич Воропаев – доктор технических наук, профессор, чл.-корр. АН СССР – ученый, внесший огромный вклад в развитие теории формирования водных ресурсов суши, рационального водопользования, управления водохозяйственными системами.



Григорий Васильевич Воропаев – директор Института в 1976–88 гг.

Г.В. Воропаев возглавлял институт 12 лет, именно в эти годы произошло становление Института как одного из ведущих научных коллективов страны. Пришло новое поколение крупных учёных, многие из которых и сейчас плодотворно работают в Институте: в области исследования гидрологического цикла суши и моделирования гидрологических процессов, гидродинамики (д.б.н.

Е.М. Гусев, д.т.н. В.К. Дебольский, д.ф.-м.н. В.Н. Демидов, д.ф.-м.н. В.Н. Зырянов, д.ф.-м.н. Л.С. Кучмент, к.г.н. Ю.Г. Мотовилов, д.г.н. Г.Н. Панин), стохастической гидрологии (д.ф.-м.н. В.Е. Привальский, к.ф.-м.н. С.В. Музылёв, д.т.н. А.В. Фролов), управления водными ресурсами и регулирования речного стока (д.т.н. А.Л. Великанов, д.т.н. Г.Х. Исмаилов, д.г.н. Г.Ф. Красножон, д.т.н. В.Г. Пряжинская, д.т.н. И.Л. Хранович), гидрогеологии (д.г.-м.н. Р.Г. Джамалов, д.г.-м.н. И.С. Зекцер, д.г.-м.н. В.С. Ковалевский), глобальной гидрологии (д.г.н. Л.П. Кузнецова, д.г.н. С.Г. Добровольский), физико-химических процессов в водной среде (д.т.н. В.Ф. Бреховских, д.ф.-м.н. В.А. Вавилин, д.т.н. В.С. Каминский, д.г.н. Л.О. Эйно), экологии и рационального природопользования (д.г.н. В.С. Залетаев, д.г.н. Н.М. Новикова), изотопных методов (д.т.н. В.И. Ферронский, к.т.н. В.С. Брезгунов), спутниковых методов (д.т.н. Ю.Л. Обьедков, к.ф.-м.н. Е.Л. Музылёв, к.т.н. И.Л. Курбатова), медико-гидрологических исследований (д.м.н. Л.И. Эльпинер). Пришли молодые специалисты, ставшие через 15–20 лет руководителями новых направлений научной деятельности Института: д.ф.-м.н. А.Н. Гельфан, к.г.н. И.Л. Григорьева, д.т.н. Е.И. Дебольская, к.г.н. М.В. Михайлова, к.г.н. О.Н. Насонова. Сформировались ведущие научные школы, развернуты комплексные натурные исследования, создан научно-исследовательский флот на Каспийском море, Волге и Северной Двине, созданы экспедиционные базы в Астрахани и Архангельске, организована (на правах структурного подразделения Института) Ивань-

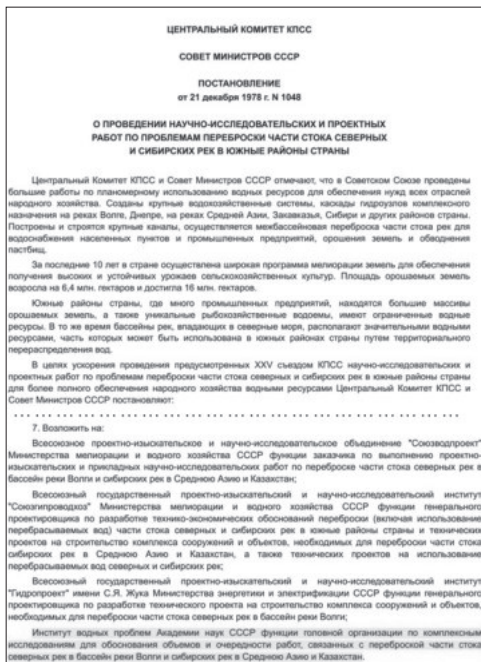


География экспедиционных работ Института в 1980-е гг.

ковская научно-исследовательская станция в г. Конаково Тверской области.

Неотъемлемой частью фундаментальных исследований стали в те годы экспедиционные работы. Их география охватывала практически все регионы страны. В числе крупных экспедиций Института следует отметить работы в бассейнах рек Волги (включая дельту и Волго-Ахтубинскую пойму), Дона, Северной Двины, Амударьи и Сырдарьи, на Северном Каспии, Белом море, Обской губе и др.

С конца 1970-х гг. значительное место в тематике Института заняли исследования по проблеме перераспределения части стока северных и сибирских рек в южные районы страны. Эти работы выполнялись в соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 21 декабря 1978 г. №1048 «О проведении научно-исследовательских и проектных работ по проблемам переброски части стока северных и сибирских рек в южные районы страны», а также с последующим совместным Постановлением Государственного комитета СССР по науке и технике, Госплана СССР и Академии наук СССР от 29 декабря 1981 г. №516/27/174 «О программе работ



на 1981–85 гг. по решению важнейшей научно-технической проблемы «Разработать научно-технические основы территориального перераспределения водных ресурсов». Академии наук СССР, Государственному комитету СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, другим министерствам и ведомствам было поручено обеспечить «проведение комплексных исследований для обоснования объемов и очередности работ, связанных с пере-

броской части стока северных рек в бассейн р. Волги и сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан». Постановлением ЦК КПСС и Совмина СССР №1048 от 21 декабря 1978г. Институт был назначен головной организацией по научному обоснованию территориального перераспределения водных ресурсов. Руководителем научно-исследовательских работ был назначен директор ИВП АН СССР Г.В. Воропаев.

В соответствии с указанными документами и заданиями государственных органов ИВП АН СССР возглавил работу 134 ведущих научных организаций страны, которые впервые были объединены для проведения теоретических, натурных и модельных исследований в районах изъятия, транспортировки и использования стока на единой методической основе. На основе комплексных многолетних исследований получены уникальные научные результаты, которые, по мнению специалистов, не потеряли своей актуальности и представляют большой интерес для науки и практики.

Полученные результаты обобщены в изданной Институтом итоговой коллективной монографии «Проблема территориального перераспределения водных ресурсов» под редакцией Г.В. Воропаева и Д.Я. Ратковича (согласно решению государственных органов монография опубликована с грифом «для служебного пользования»). Проблема территориального перераспределения водных ресурсов на протяжении многих лет находилась в центре внимания учёных и общественности, вызвала ожесточённые дискуссии, ей были посвящены многочисленные публикации. Научные результаты по этой проблеме публиковались преимущественно в материалах с грифом «для служебного пользования», что нередко приводило к их искажённому отражению в средствах массовой информации.

Развитие проекта переброски стока пришлось на период экономического кризиса, предшествующего перестройке и распаду СССР. Из-за тяжёлой экономической ситуации тех лет и на фоне





Мартин Гайкович Хубларян – директор Института в 1988–2003 гг.

развернувшейся общественной кампании против программы переброски было принято постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 14 августа 1986 г. №978, в котором признано целесообразным прекратить проведение проектных и подготовительных работ по переброске части стока северных и сибирских рек в южные районы страны. Вместе с тем, было поручено «Государственному комитету СССР по науке и технике, Академии наук СССР и ВАСХНИЛ продолжить изучение научных проблем, связанных с региональным перераспределением водных ресурсов, на основе проведения всесторонних экономических и экологических исследований, применения современных экономико-математических методов и технических средств, а также глубокого анализа отечественного и зарубежного опыта в этом деле».

В 1988 г. директором Института был избран Мартин Гайкович Хубларян – академик РАН, доктор технических наук, профессор.

Трудно переоценить роль Мартина Гайковича в развитии Института в 1990-е гг. В это сложное для страны время Институт не только сохранил основной научный потенциал, но в его коллектив пришли ведущие специалисты, положившие начало новым крупным направлениям исследований. Под руководством М.Г. Хубларяна чл.-корр. РАН Ю.С. Долотовым, д.ф.-м.н. В.Н. Зыряновым, д.ф.-м.н. В.И. Найдёновым, д.ф.-м.н. М.А. Соколовским начаты исследования в области математической физики гидросферы. Получили развитие исследования в области гидрохимии, формирования качества и охраны вод, проводимые под руководством чл.-корр. РАН А.М. Никанорова, д.ф.-м.н. Е.В. Веницианова, д.т.н. Б.М. Долгоносова, к.т.н. А.Г. Кочаряна, оценки критических антропогенных нагрузок на водные экосистемы (под руководством чл.-корр. РАН Т.И. Моисеенко), динамики наземных и водных экосистем (под руководством д.г.н. Н.М. Новиковой, д.г.н. Н.Н. Митиной), модели-

рования взаимодействия поверхности суши с атмосферой (под руководством д.б.н. Е.М. Гусева), стохастической и инженерной гидрологии (под руководством д.т.н. М.В. Болгова). Появились научные подразделения Института, расположенные в других городах страны: Гидрохимический отдел, руководимый чл.-корр. РАН А.М. Никаноровым и расположенный в г. Ростов-на-Дону и Группа исследований экологических проблем в дельте р. Волги, руководимая д.г.н. П.И. Бухарицыным и расположенная в г. Астрахань.



Виктор Иванович Данилов-Данильян – директор Института с 2003 года

С 2003 г. по настоящее время Институт возглавляет Виктор Иванович Данилов-Данильян – чл.-корр. РАН, доктор экономических наук, профессор, крупнейший учёный в области управления водными ресурсами, экологии и охраны окружающей среды, экономики природопользования, теории и методологии устойчивого развития, в том числе устойчивости водных объектов и водосборных территорий к природным и антропогенным воздействиям.

Под его руководством новое развитие в Институте получили исследования в области управления водными ресурсами, включая разработку теоретических основ стратегии рационального использования водных ресурсов и управления их качеством, совершенствование теории и методов управления водохозяйственным комплексом РФ, решение проблем экономики водопользования, разработку неструктурных мер по защите от наводнений. По инициативе В. И. Данилова-Данильяна в Институт пришли крупные учёные, под руководством которых начали развиваться новые направления исследований: в области биофизики (под руководством д.ф.-м.н. Г.М. Баренбойма), в области нормирования и стандартизации водного хозяйства (под руководством д.т.н. О.М. Розенталя), моделирования формирования стока в крупных речных бассейнах (под руководством к.г.н. Ю.Г. Мотовилова). Получили новое развитие исследования в области глобальной гидрологии (под руководством д.г.н.

С.Г. Добровольского), гидрологии речных устьев (под руководством к.г.н. М.В. Михайловой), палеогидрологии (под руководством д.г.н. Л.В. Разумовского), динамики экосистем под влиянием водного фактора (под руководством д.г.н. Ж.В. Кузьминой), гидрологии речных бассейнов (под руководством д.ф.-м.н. А.Н. Гельфана).

В настоящее время Институт водных проблем РАН – ведущий научный центр России в области фундаментальных исследований водных ресурсов, режима и качества вод суши, экологического состояния водных объектов, проблем водообеспеченности регионов России, управления водными ресурсами и водоохранной деятельностью.

Направления научной деятельности Института охватывают практически весь спектр актуальных проблем в области изучения водных ресурсов: режима и качества вод суши и прогнозирования их изменений под влиянием природных и антропогенных факторов. В его работе успешно сочетаются современные теоретические, вычислительные и экспериментальные методы и технологии, что позволяет проводить фундаментальные исследования на высоком уровне и решать прикладные задачи.

Современная научная структура Института включает 5 отделов, в том числе Гидрохимический отдел (г. Ростов-на-Дону), 13 научных



лабораторий и групп, образовательное подразделение (кафедра водных ресурсов ИВП РАН), а также Ивановскую научно-исследовательскую станцию в г. Конаково.

Институт располагает высококвалифицированными научными кадрами: около 70% сотрудников имеют учёные степени (из них – 40 докторов наук и 74 кандидата наук). В составе научных сотрудников – 2 члена-корреспондента РАН, 4 академика Водохозяйственной академии, 7 академиков Российской экологической академии, один академик и 2 чл.-корр. Российской академии естественных наук.

Трое учёных Института – Р.Г. Джамалов, Л.С. Кучмент, Л.И. Эльпинер – удостоены почётного звания «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», чл.-корр. РАН А.М. Никаноров – почётного звания «Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации».

Подготовка научно-педагогических кадров высшей квалификации осуществляется в аспирантуре Института, согласно лицензии, по двум направлениям: Науки о Земле и Техника и технологии строительства (по специальностям Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия, Гидрогеология, Гидравлика и инженерная гидрология, Геоэкология). Учебный процесс организован на кафедре водных ресурсов ИВП РАН.

Институт поддерживает тесные творческие связи с высшими учебными заведениями, ведущие учёные читают курсы лекций в крупных вузах страны, работают в составе учёных и диссертационных советов, руководят курсовыми и дипломными работами студентов, магистерскими диссертациями.



Гидравлическая лаборатория Института на базе Российского Университета Дружбы Народов

Совместно с кафедрой гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова создан Научно-образовательный центр (НОЦ) «Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление». На базе Института в 2010 г. создана Международная кафедра ЮНЕСКО «Управление водными ресурсами и экогидрология». На базе Российского Университета Дружбы Народов открыта гидравлическая лаборатория для проведения физических экспериментов по изучению динамики открытых потоков.

В Институте работает Диссертационный совет по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора наук по специальностям: Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические, технические и физико-математические науки), Геоэкология (географические науки). За последние 10 лет сотрудниками Института защищены 6 докторских и 25 кандидатских диссертаций.

По результатам исследований в 2015–16 гг. опубликовано 15 монографий; 7 учебников и учебных пособий; 6 нормативных и справочных изданий; 6 сборников научных трудов конференций; 369 статей в рецензируемых изданиях, в том числе 60 – в зарубежных.

Под редакцией В.И. Данилова-Данильяна в 2015 г. вышла в свет научно-популярная интернет-энциклопедия «Вода России». Энциклопедия подготовлена при активном участии сотрудников Института и включает более 1000 статей.

Актуальное
Вода России
Справочник
Интерактивные сервисы
Новости
Справка
Обратная связь
Об Энциклопедии
Помощь сайту

Российские Федерации входят в группу стран, чья доля обеспеченности водными ресурсами в бассейне реки России превышает среднюю планетарную и является одной из самых высоких в мире. Водные ресурсы России сосредоточены в бассейнах Северного Ледовитого и Тихого океанов, а также в бассейнах Балтийского, Каспийского, Черного, Азовского, Аральского, Среднеазиатского и других морей. Водные ресурсы России сосредоточены в бассейнах Северного Ледовитого, Тихого, Балтийского, Каспийского, Черного, Азовского, Аральского, Среднеазиатского и других морей.

Общий объем сточных водных ресурсов в России оценивается приблизительно в 66,9 тыс. км³ пресной воды, из них значительная часть сосредоточена в подземных водах, озерах и ледниках. Дефицитом водных ресурсов в России остаются в 2016 г. год, что делает Россию второй страной в мире по величине объема водных ресурсов России. При этом самый ряд регионов испытывает дефицит в воде, что связано, главным образом, с неравномерным распределением водных ресурсов по территории страны – на наиболее обеспеченные районы Европейской части России, где сосредоточены более 80% населения, приходится не более 10-15% водных ресурсов. [Читать далее...](#)

ИНТЕРАКТИВНЫЕ СЕРВИСЫ

Геолокатор
 Вода на карте России. Узнай, что находится рядом с тобой!

Народный выбор
 Поставь точку в споре – что лучше: Ладожское или Онежское, Енисей или Лена, Волга или Дняп?

Водная статистика
 Водные ресурсы России в цифрах. Построй свой график!

Вода 3D
 Планируешь водные объекты? Путешествуешь не выходя из дома!

[СЛУШАЙ](#) [ИЗУЧАЙ](#) [ПОСМОТРИ](#) [ПОСМОТРИ](#)

Домашняя страница интернет-энциклопедии «Вода России» (<http://water-ru.ru>) (под ред. В.И. Данилова-Данильяна)

Институт является соучредителем рецензируемых журналов «Водные ресурсы» и «Аридные экосистемы» (издаются на русском и английском языках), онлайн-журнала «Экосистемы: экология и динамика».

За последние 4 года получено 19 документов о государственной регистрации интеллектуальной собственности, в том числе: 6 патентов на изобретение, один патент на полезную модель, 6 свидетельств о регистрации базы данных, 6 свидетельств о о регистрации программ для ЭВМ

Институт водных проблем РАН более 20-ти лет выполняет функции базовой организации Научного совета «Водные ресурсы суши» – научно-консультативного органа при Отделении наук о Земле РАН. В состав совета входят ведущие специалисты страны в этой области. Его деятельность осуществляется во взаимодействии с президиумом РАН, отделениями РАН, а также в информационном сотрудничестве с органами государственной власти, научными организациями, высшими учебными заведениями России. Ежегодно под эгидой Совета Институтом организуются всероссийские конференции. Ежегодно проводятся международные научные конференции молодых учёных и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность», организованные Институтом под эгидой кафедры ЮНЕСКО «Управление водными ресурсами и экогидрология» при ИВП РАН.

Ведущие учёные Института участвуют в работе международных организаций – ЮНЕП, ЮНЕСКО, МАГ, МАГИ, МАГН, МАГАТЭ, ГЕМ, IAHN, ICOLD, Американского геофизического союза, Европейского союза геофизических наук и др., Комиссий Международной Ассоциации гидрологических наук, Международной комиссии по большим плотинам ЮНЕПКОМ, Международной академии устойчивого развития и др., входят в редколлегии ведущих отечественных и зарубежных журналов.

В двух томах настоящей монографии представлены основные научные достижения Института за период его 50-летней истории.

Первый том посвящён памяти ушедших из жизни выдающихся учёных, работавших в разное время в Институте: А.Б. Авакяна, Ю.А. Александровского, Г.М. Баренбойма, Е.Г. Блохинова А.И. Будаговского, С.Л. Вендрова, А.Н. Вознесенского, Г.В. Воропаева, Ю.С. До-

лотова, Л.В. Дунина-Барковского, В.С. Залетаева, И.С. Зекцера, Г.П. Калинина, В.С. Ковалевского, Д.В. Коренистова, С.Н. Крицкого, Б.И. Куделина, В.Н. Кунина, М.Ф. Менкеля, В.И. Найдёнова, М.Р. Никитина, Г.Н. Панина, В.Г. Пряжинской, Д.Я. Ратковича, К.И. Россинского, Б.А. Фидмана, М.Г. Хубляряна, Л.О. Эйнора – учёных, чьи труды создали репутацию Института как одного из ведущих научных учреждений страны. Он содержит биографии перечисленных выше учёных, а также некоторые их работы, опубликованные после 1967 г.

Во втором томе представлены статьи ведущих учёных – лидеров основных научных направлений в своей области, работающих в настоящее время в Институте. Тематика статей посвящена современным фундаментальным проблемам гидрологии суши, гидрохимии, гидробиологии, гидродинамики, гидрофизики включая проблемы исследования и моделирования гидрологического цикла суши, формирования поверхностных, почвенных и подземных вод, качества вод, состояния водных и наземных экосистем, возможных изменений водных ресурсов под влиянием природных и антропогенных факторов, рационального водопользования, стратегии управления водными ресурсами и водоохранной деятельностью, экономики водопользования и др.

Редколлегия сборника выражает признательность всем сотрудникам Института, оказавшим помощь в подготовке материалов.

Авакян Артавазд Бабкенович

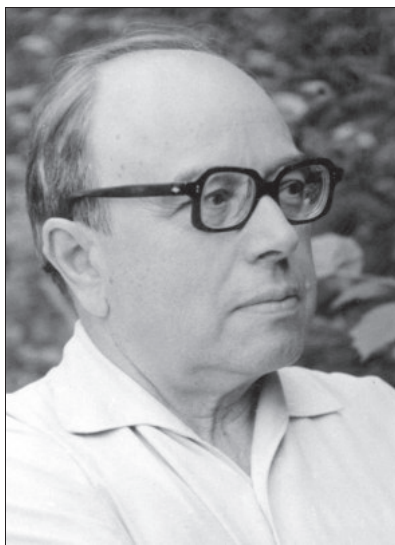
(19.07.1920 – 21.03.2003)

Артавазд Бабкенович Авакян – крупнейший учёный, специалист в области изучения водохранилищ, рационального использования и охраны водных ресурсов, доктор географических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации.

А.Б. Авакян родился 19 июля 1920 г. в г. Москве. После окончания средней школы в 1938 г. поступил на географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

6 июля 1941 г. вступил добровольцем в ряды Московского ополчения. В октябре 1941 г. попал в плен в Вяземском окружении, далее лагеря военнопленных в Польше и Австрии, побег из плена и завершение войны в 131-м полку 9-й Гвардейской армии, в котором находился до мобилизации.

По возвращении в Москву в октябре 1945 г. восстановился на 3-м курсе географического факультета; его учёба на 2-х последних курсах была отмечена именной Государственной стипендией. В 1948 г. А.Б. Авакян с отличием окончил университет и был рекомендован в аспирантуру, но предпочел практическую работу в Московском институте «Гидроэнергопроект» (ГИДЭП), где прошел путь от инженера до начальника сектора экономики водохранилищ. В июле 1962 г. переведен в институт «Энергосетьпроект» на должность главного специалиста. Его деятельность в этот период посвящена проектированию и эксплуатации водохранилищ, изучению изменений, вносимых ими в природу и деятельность человека. Здесь он приобретает большой научно-практический опыт изучения закономерностей формирования природных водных ресурсов, речных систем,



использования инженерно-технологических средств. В 1966 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию; в 1973 г. ему была присвоена учёная степень доктора географических наук.

С 1968 г. жизнь А.Б. Авакяна прочно связана с Институтом водных проблем РАН (ранее АН СССР), где он занимал должности заведующего сектором, отделом, лабораторией, а в последнее время главного научного сотрудника. С приходом в академическую науку начинается исключительно плодотворный период деятельности Артура Борисовича как исследователя и руководителя, популяризатора результатов фундаментальных исследований, что немало способствовало их реализации и повышению качества экспертизы инженерных проектов.

Многогранная научная деятельность А.Б. Авакяна посвящена исследованиям и конструктивным решениям географических проблем преобразования, рационального использования и охраны водных ресурсов. Особое внимание было уделено изучению воздействия крупных водохозяйственных мероприятий на географическую среду. Многие годы А.Б. Авакян занимался проблемами создания и комплексного использования водохранилищ, исследованием процессов формирования качества вод и их охраны, медико-биологическими проблемами водного хозяйства. Создание водохранилищ он рассматривает и анализирует как новое географическое явление планетарного масштаба; вряд ли можно назвать более крупного исследователя этой проблемы.

Работы А.Б. Авакяна включают инвентаризацию фонда искусственных водоемов земного шара, исследование их системных характеристик, выявление основных процессов и закономерностей географических условий и инфраструктуры в пределах континентов, регионов и отдельных стран. Им разработаны типология, типизация и классификация водохранилищ; концепция их рационального использования в условиях нарастающего антропогенного пресса; принципы комплексного районирования, планировки и обустройства акватории и береговой зоны; защиты побережий от наводнений. Внедрены в практику методы решения таких важных и сложных проблем, как воздействие водохранилищ на земельные, рыбные и рекреационные ресурсы; проведена оценка рекреационного потенциала водохранилищ России.

Большое значение имеет развитие А.Б. Авакяном представлений о влиянии водного фактора на формирование качества окружающей среды в результате трансформации водных и наземных экосистем. Предложенная им концепция разрешения противоречий, возникающих при использовании водохранилищ, базируется на принципе приоритета экосистемных требований перед хозяйственными интересами. Развивая теорию охраны водных ресурсов, Артур Борисович особо подчеркивал ключевую роль этических норм. Этот подход он убедительно реализовал в работах, посвященных роли культуры, образования, воспитания, морали и нравственности в решении водных проблем. В последние годы его научные исследования были направлены на решение крайне актуальной проблемы – изучению наводнений и созданию концепции защиты от наносимого ими вреда.

Научное наследие А.Б. Авакяна включает около 400 научных трудов, в том числе более 20-и монографий, книг и учебников. Наибольшую известность получили монографии «Водоохранилища гидроэлектростанций СССР» (переиздавалась три раза и стала настольной книгой проектировщиков), «Гидроэнергетические ресурсы СССР», «Водоохранилища мира», «Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду», «Водоохранилища». Широко известен написанный в соавторстве с В.М. Широковым учебник «Рациональное использование и охрана водных ресурсов».

А.Б. Авакян – талантливый популяризатор науки; его книги и брошюры, изданные массовыми тиражами, удостоены трех первых премий Всесоюзного общества «Знание», автор занесен в книгу Почета этого общества. Большой интерес для специалистов-водников и людей, озабоченных состоянием рек и водоемов России, представляют такие яркие научно-популярные публикации, как «Планетная хирургия», «Рыбы штурмуют плотины», написанные в соавторстве с Е.Г. Ромашковым, «Неиссякаемый источник», «Вода и рекреация», «Наводнения» и «О воде с тревогой и надеждой». Им опубликовано полтора десятка статей в зарубежных изданиях; более 100 работ переведены и опубликованы на английском, французском, немецком, испанском, китайском и польском языках.

На книгах и статьях Артура Борисовича выучилось и продолжает учиться не одно поколение советских и российских гидроэнергетиков и водников, инженеров и ученых.

Он был непревзойденным оратором, прекрасным лектором, в течение многих лет он читал спецкурсы и лекции по водным проблемам в различных университетах нашей страны, Чехии, Польши, на международных курсах ЮНЕСКО, ЮНЕП и ЭКЛ ООН. Немало времени и усилий Артур Борисович посвящал подготовке научной смены ? многие аспиранты и соискатели обязаны ему приобщению к научной работе, стали кандидатами и докторами наук.

А.Б. Авакян многие годы был незаменимым руководителем экспертных групп, председателем экспертных подкомиссий Государственной экспертной комиссии Госплана. В группе водохранилищ СЭВ он представлял интересы СССР, был активным членом комитета «Человек и биосфера», общества «Знание», куратором водных проблем и членом экспертного совета по наукам о Земле в РФФИ.

Он работал и во многих ученых советах, и в редколлегиях (журналы «Водные ресурсы», «Биология внутренних вод», газета «Вода России» и др.), был председателем секции водохранилищ Министерства природных ресурсов РФ.

Говоря об А.Б. Авакяне, нельзя не вспомнить его прекрасные человеческие качества – принципиальность, глубокую интеллигентность, дружелюбие, общительность, остроумие, необычайную эрудированность в самом широком круге вопросов, далеко выходящих за рамки его научных интересов. Самым ярким подтверждением справедливости этих слов является его последняя книга «Давайте улыбнемся» (так он назвал этот сборник забавных историй, связанных с водой) ? скорее художественное, а не научно-популярное произведение, написанное в период, когда Артур Борисович был уже тяжело болен. Коллеги восприняли эту книгу как своеобразное завещание автора и свидетельство необычайной силы духа.

С.Г. Добровольский (ИВП РАН),

А.Н. Гельфан (ИВП РАН),

М.И. Степанова (ИВП РАН)

Исследование водохранилищ и их воздействия на окружающую среду¹

А.Б. Авакян

Среди ресурсных и экологических проблем в современном мире к наиболее сложным и трудно разрешимым относятся проблемы обеспечения населения и хозяйства пресной, доброкачественной водой и сохранения водных и наземных экосистем.

От состояния водных ресурсов (их количества, качества и режима в водных объектах) зависит решение всех экологических, продовольственных и энергетических проблем, а также и само существование человеческого общества. Это обусловлено уникальными свойствами воды как компонента природной среды: ее незаменимостью, вхождением в состав всех сфер Земли, а также ее важной ролью в физических, химических, биологических и геологических процессах, формирующих эти сферы, быстрой и устойчивой реакцией экосистем на ее избыток или недостаток, высокой динамичностью и, наконец, обязательным участием во всех видах производственной деятельности человека. Любые изменения в окружающей среде влияют на водные ресурсы и наоборот.

Как в настоящее время, так и в ближайшие десятилетия, важнейшим средством управления водными ресурсами будут водохранилища. Хорошо известно, что эти объекты – ключ к решению многих водных и водохозяйственных проблем. Вместе с этим – это фокус противоречий между участниками водохозяйственного комплекса и, особенно, между целью их создания и побочными, как правило, нежелательными экологическими последствиями. За последние полстолетия установлено, что воздействие водохранилищ на природу и хозяйство как в прилегающих к ним районах, так и в нижних бьефах гидроузлов, широко и многообразно. Оно проявляется прямо и косвенно, может быть положительным и отрицательным [1–41]. Весьма неоднозначно влияние окружающей среды на водохранилища. Поэтому оно также должно учитываться при их проектировании, создании и эксплуатации. Объективное и доскональное знание закономерностей влияния водохранилищ на окружающую среду и окружающей среды на выбор оптимальных параметров

¹ Авакян А.Б. Исследование водохранилищ и их воздействия на окружающую среду // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. №5. С. 554–567

водохранилищ, их комплексное использование и режимы эксплуатации – залог разумного подхода общества к созданию и оптимальному функционированию этих объектов. Вот почему исследования взаимодействия водохранилищ с окружающей средой, особенно если учесть масштабы их создания за последние 50 лет, отводится столь большое внимание в институтах РАН.

До второй половины XX в. в России, да и практически во всех других странах мира, создавались в основном небольшие водохранилища преимущественно одноцелевого назначения, не оказывавшие сколь-либо существенного влияния на природные, хозяйственные и социальные условия жизни населения. Создание и эксплуатация этих водохранилищ не выдвигали перед учеными серьезных научных проблем, а с возникавшими локальными проблемами успешно справлялись проектные организации, иногда привлекавшие к работе специалистов из отраслевых научно-исследовательских институтов [7].

Впервые широкие научные исследования в связи с созданием водохранилищ в России были проведены в 20-х гг. при проектировании и строительстве Волховской и Днепровской гидроэлектростанций. Особенно активно научные исследования начали развиваться в 50–60-х гг. Их стимулировали большие масштабы гидротехнического строительства в начале в европейской части России, а затем и в Сибири. С учетом опыта проектирования, подготовки, эксплуатации водохранилищ на Волге, Каме, Ангаре, Иртыше и других больших реках пришлось решать новые проблемы, связанные с прогнозированием переформирования берегов и всплывания торфяников, исследованием влияния водохранилищ на гидродинамический, гидрохимический и гидробиологический режимы рек, на воспроизводство и нагул проходных, полупроходных и туводных видов рыб [20].

Во время эксплуатации первых крупных водохранилищ стала очевидной необходимость углубленного исследования изменений режима грунтовых вод в прибрежной полосе, влияния водохранилищ на почвы, климат, растительность и животный мир прилегающих территорий. При таком исследовании увеличилось число учитываемых факторов, усилилось изучение взаимосвязей между отдельными природными и хозяйственными процессами, расширилось

представление о зонах и районах воздействия водохранилищ и о взаимосвязи и взаимовлиянии природных и антропогенных факторов. Если в первые годы рассматривалось влияние водохранилищ в основном на прилегающие территории, то в конце 50-х гг. эти исследования стали проводиться и в нижних бьефах гидроузлов, а в 60-х гг. начали изучать влияние водохранилищ на дельты рек и приустьевые зоны морей, на те или иные природные процессы режимов уровней, расположение водохранилищ в каскаде и т. п. [7].

Одновременно с исследованием природных процессов изучалось влияние водохранилищ на хозяйственные условия. Ряд крупных не только практических, но и научных проблем возник в связи с изъятием из использования земель, переселением из зон воздействия водохранилищ сотен тысяч людей, переустройством хозяйства, подготовкой ложа водохранилищ, а в конце 50-х и начале 60-х гг., когда вступили в эксплуатацию многие крупные водохранилища, и в связи с их комплексным использованием.

Не менее важной задачей была разработка предложений и мероприятий по ликвидации и смягчению отрицательных и максимально возможному использованию положительных факторов создания водохранилищ. Ею занимались специалисты в области технических, экономических, географических, геологических, биологических, сельскохозяйственных, медицинских, юридических и ряда других наук, работающие как в проектных институтах, так и в основном по договорам в академических и отраслевых научно-исследовательских институтах и университетах. Проектные институты ставили перед последними в основном конкретные задачи, которые необходимо было решить при строительстве того или иного объекта. Сроки поведения научно-исследовательских работ были очень небольшие. То же можно сказать и о финансировании.

Многочисленные разрозненные, а нередко и противоречивые материалы не давали возможности оценить проблему в целом. Поэтому особое значение приобретали работы, обобщавшие знания по тем или иным разделам науки. Среди них следует назвать книги Л.И. Денисова и А.И. Исаева «Рыбохозяйственное использование водохранилищ» (1957 г.), В.В. Богатырева «Инженерная защита в зонах водохранилищ крупных гидроэлектростанций» (1958 г.), А.П. Борисова и В.М. Чистякова «Городское хозяйство в зоне водохранилищ»

(1960 г.), Л.С. Кускова «Водное хозяйство гидроэлектростанций» (1964 г.), И.А. Кибальчич «Санитарные вопросы гидростроительства» (1965 г.), А.М. Румянцева «Регулирование использования водных ресурсов водохранилищ» (1966 г.), Н.В. Буторина «Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада» (1969 г.), С.Л. Вендрова «Проблемы преобразования речных систем» (1970 г.) и три издания книги А.Б. Авакяна и В.А. Шарапова «Водоохранилища гидроэлектростанций СССР» (1962, 1968, 1977 гг.). Следует отметить, что необходимость в обобщающих работах по вопросам создания водохранилищ появилась уже в то время, когда оно в больших масштабах еще только намечалось. В 30-х гг. вышла в свет книга М.Б. Вольфа и В.С. Клупта «Затопление при крупном гидростроительстве. Опыт экономического исследования», а в 40-х – И.А. Лифанова «Организация чаши водохранилища» [7].

Итак, отдельные вопросы создания и эксплуатации водохранилищ решались с тем или иным успехом, однако в целом о проблеме их создания, комплексного использования и воздействия на окружающую среду как у проектировщиков, так и у научных работников имелись различные мнения, которые высказывались на всех стадиях разработки, согласования и утверждения проектов водохранилищ, при их создании и эксплуатации. Все это не давало возможности выработать стратегию и тактику в вопросах создания и использования этих искусственных водоемов и затрудняло принятие оптимальных решений на всех этапах их проектирования и эксплуатации [2, 5, 20, 22].

Естественно, что академические институты не могли стоять в стороне от решения грандиозных задач преобразования природы водных объектов страны.

Первым таким институтом, подключившимся к решению этих проблем, был Институт географии, занявшийся разработкой вопросов взаимодействия крупных водных систем с окружающей природной средой. Особенно активно это направление начало развиваться с приходом в него в 1962 г. Семена Леонидовича Вендрова, проработавшего до этого многие годы в ГГИ, Гипроречтранс и Госводхозе РСФСР. Большой заслугой группы географов института (Л.К. Малик, К.Н. Дьяконов, А.Ю. Ретеюм), которой руководил

С.Л. Вендров, была разработка основных положений и первая попытка комплексной оценки воздействия водохранилищ на окружающую среду. До этого проектные и отраслевые институты исследовали и оценивали влияние на окружающую среду последствий создания водохранилищ (подтопления, переформирования берегов, изменения климатических, почвенных условий и т. п.) [29, 30].

Широкое развитие гидротехнического строительства в бассейне Волги и ввод в 30–50-х гг. в эксплуатацию Иваньковского, Угличского, Рыбинского, Горьковского, Куйбышевского, Волгоградского и Камского гидроузлов коренным образом изменили гидрологический, гидрохимический и гидробиологический режимы Волги и Камы. Потребовалось существенное усиление исследований, ведущихся сотрудниками многих университетов этого региона [34, 39, 40], учеными АН СССР. Выбор места создания академического института был как бы предрешен самой историей. В 1932 г. почетный академик Н.А. Морозов передал АН СССР часть своей усадьбы Борок, расположенной в Некоузском р-не Ярославской обл. В 1938 г. здесь была создана Верхневолжская база АН СССР, оказавшаяся в связи с заполнением Рыбинского водохранилища на берегу его Волжского отрога. В 1947 г. она была преобразована в биологическую станцию Борок им. Н.А. Морозова. Сотрудники станции активно включились в биологические исследования крупных водохранилищ. Успешное выполнение исследований и непрерывно растущий масштаб работ дали основание для реорганизации станции в 1956 г. в Институт биологии водохранилищ АН СССР. В 1962 г. он был преобразован в Институт биологии внутренних вод (ИБВВ) АН СССР.

В настоящее время ИБВВ РАН – всемирно известный научный центр России, где проводятся фундаментальные исследования в области гидробиологии и экологии пресных вод, структуры и функционирования пресноводных экосистем, биологии, морфологии и систематики водных организмов и водной растительности, генетики и иммунологии рыб, биологического круговорота веществ и других биологических проблем внутренних водоемов [23, 26, 27, 31–33]. В исследованиях активно участвуют гидрологи и гидрохимики. С 1994 г. ИБВВ РАН при содействии научного совета по гидробиологии и ихтиологии и Всероссийского гидробиологического общества издает журнал «Биология внутренних вод».

Несмотря на высокую оценку работ, проводимых в Институте географии, ИБВВ, во многих проектных и отраслевых институтах, потребовалось создание единого научного центра, в котором рассматривались и решались бы проблемы оценки водных ресурсов в целом и их комплексного использования с максимальным учетом интересов всех отраслей хозяйства и прогнозом изменений, вносимых водохозяйственным строительством в окружающую среду и условия жизни, и состояние здоровья населения. По предложению ряда организаций Госплана СССР, многих министерств и комитетов, а также АН СССР правительство СССР в ноябре 1967 г. рассмотрело и приняло решение о создании в АН СССР Института водных проблем (ИВП).

Среди важнейших направлений деятельности ИВП было изучение воздействия водохранилищ на окружающую среду, оценка влияния изменений гидрологического режима на функционирование экосистем внутренних водоемов и наземных биогеоценозов, обоснование экологических требований к режимам водных объектов, медико-экологическая оценка влияния изменений режима и качества вод суши на условия жизни и состояния здоровья населения. Это был единственный в системе АН СССР институт, в котором был создан сектор водохранилищ [22].

В рамках одной статьи не представляется возможным с необходимой полнотой охарактеризовать все аспекты проблемы создания, использования и эксплуатации водохранилищ и их воздействия на окружающую среду. Поэтому рассмотрим лишь некоторые из них.

С момента создания сектора водохранилищ и до настоящего времени изучается мировой фонд водохранилищ. Как это ни парадоксально, но о самом объекте исследования в масштабе страны и мира в конце 60-х-начале 70-х гг. у лиц, занимающихся теми или иными аспектами водохранилищ, не было никакого представления. Нередко даже в научных аудиториях приходилось слышать, что водохранилища создаются только в СССР, а в странах, где высокие цены на землю, водохранилищ нет. Изучение литературных и проектных материалов, научных отчетов, проводившееся автором и сотрудниками сектора В.А. Шараповым, В.Б. Яковлевой, С.П. Овчинниковой и О.О. Петровой, их всесторонний анализ позволили составить представление о распределении водохранилищ на земном

шаре, динамике их создания и показать, что водохранилища – явление планетарного масштаба [8, 17]. Основное представление о динамике роста и числе водохранилищ дают табл. 1 и 2 [41].

Из приведенных данных видно, что пик создания водохранилищ на земном шаре в целом пришелся на 60-е гг. Затем темпы создания водохранилищ начали снижаться, но и в 1986–1995 гг. в эксплуатацию было введено ~200 крупных водохранилищ суммарным объемом ~1000 км³. Таким образом, проблемы создания и эксплуатации водохранилищ остаются весьма острыми и актуальными.

Ежегодно на Земле вступают в эксплуатацию несколько сотен новых водохранилищ. Сегодня их >60 тыс. Их объем >6,6 тыс. км³, а площадь водного зеркала равна 400 тыс. км². Трудно теперь найти реку, на которой нет хотя бы одного водохранилища. Волга, Днепр, Ангара, Колумбия, Миссури, Теннесси, Парана и сотни других больших и средних рек по существу стали каскадами водохранилищ.

Создание водохранилищ привело к преобразованию природных условий на территории 700 тыс. км² и к изменению инфраструктуры в связи с мероприятиями по переселению населения и переустройству хозяйства на территории 1,5 млн км² [31, 32].

За 30 лет работы сотрудникам ИВП, и прежде всего сектора водохранилищ, пришлось участвовать во многих исследованиях, связанных со всеми аспектами создания, использования, эксплуатации водохранилищ и их воздействия на окружающую среду. Условно эти исследования могут быть подразделены на три группы.

К первой группе можно отнести исследования по изменению гидрологических, гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических условий при зарегулировании речных систем и исследования по воздействию водохранилищ на подтопление, переформирование берегов, всплывание торфяников, изменение почвенного покрова, растительности, животного мира, микроклиматических условий и условий жизнедеятельности населения. Эти работы выполнялись по договорам с проектными и отраслевыми институтами, а также по инициативе отдельных коллективов и сотрудников. По подсчетам В.С. Сметанича и группы сотрудников ИВП, по этой тематике в печати опубликовано >100 тыс. работ. Поскольку наиболее интересные работы в этой области будут в той или иной степени рассмотрены специалистами в статьях, освещающих достижения

Таблица 1

Динамика роста числа (числитель) и объемов (знаменатель), км³, водохранилищ (полным объемом от 0,1 км³)
(здесь и в табл. 2 прочерк – отсутствие данных)

Материк	до 1900	1901–1950	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	после 1990	Итого
Сев. Америка	25/ 8,4	342/ 344,7	178/ 254,4	216/ 534,0	113/ 339,0	34/ 176,9	7/ 34,7	915/ 1692
Центральная и Юж. Америка	1/ 0,3	22/ 8,8	30/ 28,8	54/ 96,9	88/ 251,5	51/ 349,1	19/ 236,1	265/ 971,5
Европа	9/ 3,3	104/ 121,7	113/ 175,0	172/ 189,4	94/ 103,6	76/ 49,3	8/ 2,7	576/ 645,0
Азия	5/ 1,7	47/ 17,9	161/ 293,6	215/ 640,0	222/ 484,1	138/ 321,5	27/ 221,6	815/ 1980,4
Африка	1/ 0,1	15/ 15,0	21/ 381,1	24/ 364,4	57/ 173,7	52/ 56,6	6/ 9,8	176/ 1000,7
Австралия и Нов. Зеландия	–	10/ 10,6	21/ 20,1	18/ 15,5	27/ 42,4	12/ 5,9	1/ 0,3	89/ 94,8
Всего	41/ 13,8	540/ 518,7	524/ 1153,0	699/ 1840,2	601/ 1394,3	363/ 959,3	68/ 505,2	2836/ 6384,5

институтов РАН в соответствующих областях науки, автор на них здесь не останавливается.

К этой же группе отнесены и работы, выполнявшиеся по поручению директивных органов. Так, например, по поручению ЦК КПСС и Совета Министров СССР в 1975 г. ИВП совместно с ИБВВ выполнена работа по прогнозу изменений качества воды Ивановского водохранилища на перспективу до 1990 г. Руководили этой работой А.Б. Авакян и К.И. Россинский.

Ко второй группе отнесены инициативные работы, включавшиеся в планы исследований ввиду их исключительной актуальности в научном отношении и важности для выбора направлений дальнейших путей развития водного хозяйства страны. В их числе, в первую очередь, следует указать на такие проблемы, как воздействие водохранилищ на земельные ресурсы [7, 22]; воздействие водохранилищ на качество воды [10, 12, 13, 33]; последствия создания водохранилищ для природы и хозяйства [2, 5, 7]; экономические, социальные и экологические последствия ликвидации водохранилищ [6].

К третьей группе, по-видимому, наиболее важной, относятся исследования взаимосвязей отдельных компонентов вод суши с

Таблица 2

Динамика создания водохранилищ в некоторых странах мира
(числитель – число водохранилищ, знаменатель – общий объем, км³)

Страна	до 1900	1901– 1950	1951– 1960	1961– 1970	1971– 1980	1981– 1990	после 1990	Итого
Россия	3/ 2,2	27/ 50,8	29/ 222,9	21/ 357,8	20/ 193,9	4/ 11,2	-	104/ 838,8
США	22/ 8,4	286/ 264,6	127/ 112,6	172/ 210,7	80/ 88,9	14/ 14,5	1/ 0,9	702/ 700,6
Канада	–	52/ 77,9	43/ 122,1	27/ 280,4	23/ 232,7	5/ 145,7	4/ 17,5	154/ 876,3
КНР	–	–	84/ 118,4	83/ 72,1	66/ 58,2	22/ 50,0	10/ 45,9	265/ 344,6
Индия	4/ 1,4	24/ 11,5	34/ 32,3	48/ 60,5	72/ 73,1	29/ 64,6	1/ 4,4	212/ 247,8
Мексика	1/ 0,1	17/ 17,9	8/ 19,6	17/ 43,1	10/ 17,9	15/ 16,8	2/ 16,2	70/ 131,6
Бразилия	–	11/ 9,9	19/ 30,8	24/ 63,8	38/ 150,9	15/ 152,2	2/ 33,0	109/ 440,6

окружающей средой, определение качественных и количественных закономерностей проявления и трансформации этих взаимосвязей, включая динамику экосистем в различных природных и техногенных условиях. Таким образом, для исследования водохранилищ как элемента окружающей среды необходимо проведение фундаментальных работ по созданию теории развития водных экосистем, их продуктивности и качества воды в условиях зарегулирования стока речных бассейнов.

Наибольшее зло от водохранилищ многие противники их создания связывают с уменьшением земельного фонда. В печати указывались самые различные площади земель, затопленные водохранилищами в СНГ (от 10 до 100 млн га). Наиболее часто площадь земель, затопленных водохранилищами в СНГ, сравнивалась с площадью Франции (55 млн га). Некоторые авторы приводимые цифры относили ко всем землям, другие – к сельскохозяйственным. На этой основе уменьшение площади сельскохозяйственных земель в стране объяснялось ими в основном созданием водохранилищ.

Как же обстоит дело в действительности? Ниже излагаются результаты исследований, проведенных автором совместно с В.Л. Шараповым и А.А. Полюшкиным.

В целом по СНГ в связи с созданием водохранилищ затоплено – 7 млн га земель. Структура изъятых сельскохозяйственных угодий характеризуется следующими показателями: пашня – 0,7 млн га (10%), сенокосы и пастбища – 1,8 млн га (29%). Площади земель, попадающих в зоны обрушения берегов, составляют по данным многочисленных исследований 3–5%: площадей затопления. Таким образом, площади изымаемых земель с учетом переработки берегов составляют соответственно 7,3 и 7,6 млн га.

Примерно 10–15% площади затопления, и лишь по отдельным водохранилищам 70–80%, приходится на подтопленные земли. Однако эти земли не отчуждаются у землепользователей и во многих районах продолжают использоваться в сельском хозяйстве. Сенокосы и выгоны остаются, хотя качество их на части площади ухудшается, а в некоторых случаях и улучшается. Пашни трансформируются в сенокосы или выгоны. В природно-территориальных комплексах средней полосы при повышении уровня грунтовых вод до 1 м продуктивность подтопленных кормовых угодий может снизиться до 50%.

Значительные площади земель, в том числе и сельскохозяйственных, приходится занимать для размещения объектов, выносимых из зон воздействия водохранилищ.

Учитывая все сказанное, следует считать, что в связи с созданием водохранилищ общая площадь земель, используемых в сельском хозяйстве, уменьшилась примерно на 3 млн га. Таким образом, в связи с созданием водохранилищ в СНГ изъято 0,31 % общей площади земель этих стран и 0,5% сельскохозяйственных угодий.

Приведенные цифры не отражают потерь сельскохозяйственной продукции, так как водохранилищами затопляются, как правило, лучшие сельскохозяйственные угодья. Сказанное в первую очередь относится к пойменным сенокосам, урожаи трав на которых в 3–5 раз, а в иных случаях и более превышают урожаи суходольных сенокосов.

Уместно отметить, что ~90% изъятых земель, в том числе и сельскохозяйственных, используется для нужд промышленности, транспорта, городов и других надобностей, поэтому на долю земель, занятых под водохранилища, приходится ~10%. При этом в отличие от земель, занимаемых под промышленные и транспортные нужды и города, земли, занятые под водохранилища, как правило, не полностью потеряны для сельского хозяйства.

Значительный резерв производства сельскохозяйственной продукции – мелководья водохранилищ. Из общей площади мелководий с глубиной до 2 м, составляющей ~1,4 млн га, сельским хозяйством может быть использовано по предварительным расчетам около трети.

На водохранилищах многолетнего регулирования, достигающих отметки НПУ один раз в несколько лет, сельским хозяйством могут использоваться и частично используются земли, изъятые под зону затопления.

Отдельные участки дна водохранилищ сезонного регулирования стока, освобождающиеся из-под воды в июне-июле в связи со сработкой водохранилищ, также могут частично использоваться в сельском хозяйстве. Общая площадь таких земель на водохранилищах СНГ составляет десятки тысяч гектаров. Исследование путей рационального использования этих земель на водохранилищах, расположенных в разных географических зонах страны, представляет значительный практический интерес.

Часть затопленных водохранилищами земель снова превращается в сушу, так как формирование берегов водохранилищ идет не только по абразионному, но и по аккумулятивному типу. От водохранилищ со временем отчлениются и затем постепенно заполняются наносами небольшие, но многочисленные заливы. Путем рекультивации эти земли могут быть возвращены сельскому хозяйству.

Таким образом, земли, изымаемые в связи с созданием водохранилищ, не полностью теряются для сельского хозяйства. Часть их используется уже в настоящее время, а еще большая часть может быть интенсивно использована при проведении необходимых мероприятий.

Следует учитывать также и то обстоятельство, что вся акватория водохранилища участвует в воспроизводстве такой ценной биопродукции, как рыба.

Все вышесказанное относится практически ко всем водохранилищам вне зависимости от их назначения и географического положения. Вместе с тем имеются два вида водохранилищ (ирригационные и противопаводковые), создание которых не только не уменьшает, но и существенно увеличивает возможность использования земель в сельском хозяйстве. Только созданные в настоящее время

водохранилища комплексного и ирригационного назначения позволяют вовлечь в сельскохозяйственный оборот почти в 3 раза больше земель, чем вся площадь сельскохозяйственных угодий, затопленных водохранилищами в СНГ. Без зарегулирования рек эти земли не были бы обеспечены водой.

Весьма существенный прирост земель, используемых в сельском хозяйстве, наблюдается при создании водохранилищ в районах, страдающих от наводнений.

Проведенные исследования показали, что водохранилища по вызываемым ими изменениям в использовании земельных ресурсов страны весьма неоднородны. С точки зрения интересов сельского хозяйства их можно разделить на три группы:

- водохранилища, ведущие к увеличению возможностей использования земельных и биологических ресурсов, среди которых, в первую очередь, следует выделить ирригационные, противопаводковые и комплексного назначения;
- водохранилища, не оказывающие сколь-либо существенного влияния на земельные и биологические ресурсы (многие комплексные водохранилища, имеющие ирригационное, противопаводковое и рыбохозяйственное значение, у которых положительные последствия по отношению к отрицательным измеряются коэффициентами 0,8–1,2), и небольшие водохранилища любого назначения;
- водохранилища, существенно уменьшающие земельные и биологические ресурсы (большие энергетические и энергетико-транспортные водохранилища, создаваемые на равнинах).

Следует подчеркнуть, что затопленная водохранилищами площадь продолжает участвовать в расширенном воспроизводстве, но только в другом производственном комплексе. Поэтому при рассмотрении вопросов, связанных с созданием водохранилищ, важнейшая задача – установление экономического эффекта использования территории для различных производственных целей. Для этого должны быть проанализированы все факторы, ведущие к увеличению или уменьшению сельскохозяйственной продукции, рассчитана экономия затрат на производство электроэнергии, перевозку грузов и т. п. из расчета на 1 га как всех изымаемых земель, так и сельскохозяйственных, а также учтены все внеэкономические факто-

ры, связанные с ухудшением или улучшением использования территорий, отводимых под водохранилище.

Вопрос о том, что важнее: территория или акватория, по мнению автора статьи, надуман. С точки зрения интересов народного хозяйства на каждом этапе его развития должно быть такое состояние и соотношение водных и земельных ресурсов, которое позволяло бы наиболее полно удовлетворять разнообразные, непрерывно растущие материальные и культурные потребности общества. При этом в каждом случае при проектировании водохранилищ следует стремиться к тому, чтобы решение водохозяйственных проблем было связано с минимальным изъятием земель.

В последние годы появилось немало статей, авторы которых пытаются доказать, что загрязнение вод во многих бассейнах страны связано с созданием водохранилищ. Влияние водохранилищ на качество воды исследовалось в ИВП на протяжении ряда лет, что позволило составить собственное представление об этой проблеме. Активное участие в проводимых исследованиях принимали В.С. Каминский, А.Г. Кочарян, Л.О. Эйно́р, Е.В. Венецианов, К.И. Сафронова, А.Н. Малютин, Г.Л. Марголина. Не вступая в полемику с различными авторами, хотелось бы обратить внимание лишь на следующие принципиальные обстоятельства [7, 10, 12, 13]:

- обобщение обширной литературы показало, что влияние физико-химических и биологических процессов, происходящих в водохранилищах, на качественный состав поверхностных вод не одностороннее и не неизменное во времени. Оно определяется соотношением процессов различной направленности, поэтому возможна неоднозначность изменения стока химических веществ реки после прохождения ее вод через водохранилище, в том числе и в разные сезоны года;
- загрязнение вод во многих бассейнах произошло от переизбытка промышленных, транспортных, коммунальных и сельскохозяйственных сточных вод. При этом уровень загрязнения на ряде участков рек, не зарегулированных водохранилищами, не уступает, а нередко и превышает таковой в водохранилищах;
- многолетние исследования водохранилищ показывают, что при прочих равных условиях их создание приводит к снижению мут-

ности, общей цветности, запаха, количества сапрофитных бактерий, содержания тяжелых металлов;

- благодаря наличию в водохранилищах больших объемов воды активность деструкционных процессов здесь в целом выше, чем в реках, особенно в меженный период. Поэтому качество воды по большому набору ингредиентов лучше, чем в реках в естественном состоянии. В первую очередь это относится к нижним бьефам;
- с современными масштабами загрязнения не в состоянии справиться ни реки, ни озера, ни водохранилища, ни моря и даже ни океаны. Поэтому попытки связать ухудшение качества природных вод лишь с созданием водохранилищ не только ошибочны, но и в определенной степени вредны, так как подменяют причины следствиями. Ссылки на замедленный водообмен здесь не состоятельны. Достаточно напомнить, что на протяжении тысячелетий и до второй половины XX в. многие озера не только с замедленным водообменом, но даже лишённые стока сохраняли превосходные качества воды. Классическими примерами служат Байкал, Ладожское, Онежское, Севан и многие другие озера, расположенные на всех континентах земного шара;
- следует твердо знать, что пока не будет надежного заслона использованию водных объектов в качестве приемников неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод и других загрязнителей, ни о каком улучшении качества вод не может быть и речи.

Многочисленными исследованиями последствий преобразования режима рек установлено, что при создании водохранилищ происходят многообразные изменения природных и хозяйственных условий на территориях, непосредственно прилегающих к новому водоему, а также удаленных от него на десятки и сотни километров ниже по течению реки вплоть до устья и взморья. При этом наряду с заранее запланированными благоприятными последствиями возникают и негативные последствия [2, 4, 15, 16, 18, 19, 20, 28].

Зарегулирование стока водохранилищами сказывается на различных элементах окружающей среды: на гидрологическом, гидрохимическом и гидробиологическом режимах в верхнем и нижнем бьефах гидроузлов вплоть до устьев рек, на водных и на земных экосистемах, на хозяйственных объектах и на социально-экономиче-

ских условиях жизни людей. На степень изменения природных процессов и их направленность в верхних бьефах гидроузлов в первую очередь влияют площадь, объем, глубина, длина, ширина водохранилища, его конфигурация в плане, состав пород, слагающих дно и берега водоема, характер регулирования и режим эксплуатации, климатические условия района. На изменение гидрологического режима и природных условий в нижнем бьефе наиболее значительно влияют характер и размеры преобразования стока в многолетнем, сезонном, недельном и суточном разрезе [31, 32].

Водоохранилища играют важную роль в преобразовании природы и хозяйства, особенно непосредственно в районах их создания. Решая многие водохозяйственные проблемы и устраняя или смягчая противоречия, возникающие и обостряющиеся по мере развития хозяйства, водохранилища порождают новые противоречия между отраслями водного хозяйства, предъявляющими разные требования к характеру и степени регулирования стока, к параметрам, подготовке ложа, режиму эксплуатации, времени создания, условиям первоначального наполнения, к месту расположения и составу сооружений гидроузла и т. п. Возникают и внутриотраслевые противоречия, поскольку создание водохранилищ имеет для каждой отрасли водного хозяйства, за исключением гидроэнергетики, не только положительные, но и отрицательные последствия. По мере развития водного хозяйства, а также строительства каскадов и межбассейновых соединений происходит обострение некоторых меж- и внутриотраслевых противоречий [21, 29].

Влияние водохранилища на окружающую среду многообразно: оно может быть прямым и косвенным, положительным и отрицательным, проявляться немедленно или много лет спустя после создания. Это влияние зависит также от внутривековых и других климатических флуктуаций, которые могут гасить или усиливать воздействие водохранилищ на климат, гидрологические, гидрогеологические и другие процессы [9].

Ниже водохранилищ ландшафт речной долины также существенно изменяется, особенно при сезонном и многолетнем регулировании стока. В результате срезки пиков или полного прекращения паводков уменьшаются площади весеннего затопления поймы, происходит ее осушодоливание [38]. Изменение режима твердого стока

вызывает размывы русла непосредственно ниже гидроузлов и изменение характера русловых процессов в дельтах. Особенно значительно изменяется ландшафт речных долин при отводе всего или большей части речного стока по деривационным каналам или тоннелям в соседние речные бассейны.

Процессы, происходящие в водохранилищах, определяются в значительной степени их проточностью или водообменностью, которая обуславливает постоянные стоковые течения, интенсивность турбулентного перемешивания, формирование температурной стратификации, минерализацию и аэрацию вод, гидрохимические, гидробиологические и другие особенности. Проточность водохранилищ изменяется как по годам, так и по периодам года в зависимости от водности, использования водных ресурсов водохранилищ и других факторов. По сравнению с естественными условиями проточность водохранилищ и скорость пробега воды уменьшаются иногда в 10 раз и более.

Н.В. Буторин установил, что в водохранилищах происходит сложная трансформация речных водных масс и формирование собственных водохранилищных водных масс. Основные характеристики водных масс в каждый из сезонов года довольно постоянны от года к году, как и общие закономерности их размещения в водохранилищах [27].

Изменения гидрологического режима (уровней, проточности, течений, волнения, твердого стока наносов и т. д.) в верхних и нижних бьефах гидроузлов соответственно сказываются на внутриводоемных гидробиологических процессах, приводя к формированию в водохранилищах специфических биотопов и биоценозов.

К общепланетарным проблемам, вызываемым загрязнением и уменьшением водных ресурсов суши, на водохранилищах прибавляются проблемы, связанные с их уровенным режимом. Экосистемы водохранилищ формировались и формируются под влиянием инженерных решений, направленных, как известно, на оптимальное использование создаваемых водоемов прежде всего в интересах энергетики, водного транспорта, ирригации и для борьбы с наводнениями. В связи с этим абиотическая и биотическая составляющие не соответствуют нормальному функционированию экосистемы, что осложняет формирование воды нормативного каче-

ства и оказывает отрицательное влияние на биопродукционный потенциал.

Таким образом, существенная отличительная черта водохранилищ от естественных водных объектов – их формирование и развитие в условиях воздействия деятельности человека на параметры среды, уровенный режим и, следовательно, на биоту. Действуя как пусковой механизм, уровенный режим изменяет режим течений, температуру, кислородный режим, формирование рельефа дна и берегов, волновой и ледовый режимы. В естественных водоемах водные организмы на протяжении тысячелетий адаптированы к природному ходу уровня воды. Неблагоприятные колебания уровня в водохранилищах проявляются в быстроте подъема и падения, не характерного, как правило, для природных водоемов, неестественных изменениях его по сезонам года и большом размахе колебаний уровня.

В работах, выполненных совместно с сотрудниками ИБВВ И.К. Ривьер, А.Г. Поддубным, С.А. Поддубным, рассматривается и анализируется влияние изменений режима уровней водохранилищ верхней Волги на абиотические и биотические составляющие их экосистем. Показано, что оптимизация хода уровня в ряде случаев не вызывает значительных нарушений в целевом использовании водохранилищ, может улучшить условия нереста, нагула и зимования рыб, формирования прибрежной растительности и существования донных биоценозов.

В выполненных исследованиях проведена оценка влияния абиотических факторов на естественное воспроизводство биомассы в водоемах. Показано, что одним из интегральных показателей состояния ихтиоценоза экосистемы водоема служит его общая естественно воспроизводимая ихтиомасса, выражаемая в кг/га акватории. Среди основных факторов, влияющих на естественное воспроизводство биомассы в водоемах, рассматриваются природно-климатические, антропогенные и экосистемные. Показано, что при наличии ряда неблагоприятных абиотических факторов для жизнедеятельности гидробионтов естественно воспроизводимая ихтиомасса в зависимости от степени воздействия может снижаться в тропических водоемах с 1600 до 600, в водоемах, расположенных в умеренной зоне, с 1300 до 700 и в хладноводных водоемах с 480 до 60–200 кг/га.

Рассматриваются природные и антропогенные факторы снижения рыбопродуктивности в водохранилищах Волги, объединенные в четыре группы: нарушение биотопных структур, изъятие воды и аномалии режима уровней, аномалии температур, загрязнение. Сделана попытка выявить значение абиотической составляющей и показать возможность ее улучшения на примере одного из крупнейших водохранилищ России и мира – Рыбинского. Показано, что в результате предложенной схемы экологического обустройства отдельных плесов Рыбинского водохранилища существующий дефицит продуктивности биотопов может сократиться по защищенным мелководьям на 10, по нерестилищам на 6, по зонам аккумуляции биомассы в сублиторали и профундали на 20% [16].

Изменения ландшафта и гидрологического режима реки оказывают большое влияние на окружающую среду прилегающей территории.

Взаимодействие водохранилищ с окружающей средой, прежде всего с природой водосборной площади (особенно прилегающей к водохранилищу) и лежащих ниже по течению (подкомандных) территорий и акваторий, существенно отличается от взаимодействия естественных рек с окружающей средой. Отличия эти неодинаковы для горных и равнинных территорий, для разных широтных и высотных географических зон.

В результате появления в речных долинах больших водных масс, аккумулирующих и затем медленно отдающих большие количества тепла, большой ширины водного зеркала и других факторов над самим водоемом и на прилегающих территориях изменяются микроклиматические условия; эти изменения касаются практически всех элементов климата – радиационного баланса, температуры и влажности воздуха, ветрового режима и т. д. Влияние даже крупных водохранилищ на климат распространяется в относительно узкой береговой полосе шириной до 15 км. Однако практически значимое влияние на климат сказывается в полосе 1–3 км [31].

Изменения климатических и гидрологических условий вызывают повышение на прилегающих территориях уровня грунтовых вод, вплоть до заболачивания земель, изменение их минерализации, трансформацию почв в сторону развития процессов оглеения и торфообразования, изменение растительного покрова в направле-

нии увеличения доли гидрофильных видов флоры, нарушение условий обитания животных (особенно водных и полуводных пушных зверей, и водоплавающей птицы). Масштабы этих изменений в природной среде весьма значительны. Так, общая площадь подтопленных земель на побережьях водохранилищ России и сопредельных стран оценивается в сотни тысяч гектаров; из общей протяженности берегов водохранилищ СНГ подвержены переработке более половины и т. д.

На территориях, прилегающих к рекам с зарегулированным стоком, ниже водохранилищ, также наблюдается существенное изменение окружающей среды. На некоторых реках (Волге, Иртыше и др.) эти изменения, грозившие стать необратимыми, были предотвращены в результате осуществления специальных пропусков воды из вышележащих водохранилищ (Куйбышевского, Бухтарминского), которые в той или иной степени восстанавливали естественный половодный режим. Так, в низовьях Волги для обводнения Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги в интересах рыбного хозяйства ежегодно сбрасываются в конце весны-начале лета от 70 до 130 км³ (в зависимости от водности года).

Водоохранилища, как установлено в последние годы, влияют на современные тектонические процессы, способствуя возникновению, увеличению частоты и усилению землетрясений.

Поскольку охарактеризовать все выполненные работы в секторе водохранилищ не представляется возможным, приводимое ниже краткое перечисление отдельных работ дает некоторое представление о направленности и тематике работ сектора.

Обобщение данных о водохранилищах России, сопредельных стран и всех континентов потребовало большого объема исследовательской и аналитической работы по сбору и анализу разрозненных и часто противоречивых сведений и данных, разбросанных по тысячам литературных публикаций, кадастровых и фондовых материалов, информационных изданий различных национальных и международных организаций. Особенность выполненных и проводимых до настоящего времени работ – их комплексность. Водоохранилища рассматриваются как сложные и диалектически противоречивые объекты, выступающие в двух системах связей – связей природных и общественных явлений. Показывается, что их создание связано для

природы, населения и хозяйства как с положительными, так и с отрицательными последствиями. Результаты работ в этой области были освещены во многих сотнях статей, десятках брошюр и четырех монографиях [20, 21, 31, 32].

Монография «Водохранилища и их воздействие на окружающую среду», отражающая мировой уровень исследований, вышла под эгидой Советского комитета по программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера», секции химико-технологических и биологических наук и секции наук о Земле АН СССР. Руководителем коллектива, подготовившего монографию, был автор настоящей статьи.

Сектор – инициатор исследования проблем, связанных с рекреационным использованием водохранилищ [25]. Наряду с автором статьи, активное участие в исследованиях принимали В.Б. Яковлева, И.В. Ланцова, В.К. Бойченко, В.П. Салтанкин, В.А. Шарاپов. Результаты исследований были обобщены в монографии «Рекреационное использование водохранилищ: проблемы решения» и внедрены в практику проектирования водохранилищ [35]. В секторе были развернуты работы по оценке возможностей применения аэрокосмической информации к изучению водохранилищ [57]. Впервые в России и мире были исследованы социальные, экологические и экономические последствия спуска (ликвидации) крупных водохранилищ [6].

В 1972 г. была выдвинута идея повышения эффективности комплексного использования водных, земельных, биологических, рекреационных и энергетических ресурсов водохранилищ на основе проведения акваториального районирования, планировки и инженерного обустройства внутренних водоемов [1]. К разработке этой идеи были привлечены сотрудники сектора Ю.И. Новосельский и В.П. Салтанкин. В последние годы была предложена концепция рационального использования водохранилищ в условиях растущего антропогенного воздействия. Эта концепция разрабатывалась совместно с сотрудниками ИБВВ А.Г. Поддубным, И.К. Ривьер и С.П. Поддубным [16, 23].

Исследование актуальных проблем водного хозяйства в целом в немалой степени способствовало подготовке автором совместно с В.М. Широковым вначале учебного пособия «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» [23], а затем и учебника «Рацио-

нальное использование и охрана водных ресурсов», рекомендованного Комитетом по высшей школе Миннауки России в качестве учебника для студентов географических, биологических, строительных специальностей вузов [24].

Немалую роль сотрудники РАН сыграли в борьбе с гигантоманией при создании водохранилищ. В 50–60-х гг. выдвигались и разрабатывались предложения о создании Нижнеобского и Нижнеленского водохранилищ, каждое из которых по площади и объему превышало бы все вместе взятые водохранилища, находившиеся в то время в эксплуатации. Создание этих водохранилищ вызвало целую бурю в печати. Противниками их были многие тысячи наших сограждан. На разных этапах экспертизы этих проектов автором статьи и С.Л. Вендровым были приложены большие усилия и использованы накопленные знания, чтобы воспрепятствовать дальнейшей их разработке и реализации.

Большое внимание С.Л. Вендров и В.А. Шарапов уделяли назначению сбросных расходов из водохранилищ в нижние бьефы, прежде всего в устьевые зоны рек. Ими было показано важное значение искусственных половодий для сельскохозяйственных, рыбохозяйственных, экологических и общегигиенических целей [29, 38].

Проведенное как в целом по миру, так и особенно по России и сопредельным странам масштабное обобщение материалов по различным аспектам создания, комплексного использования водохранилищ и их воздействия на окружающую среду позволило выдвинуть и обосновать ряд излагаемых ниже положений, имеющих важное значение для выработки принципиального отношения и объективного подхода к оценке роли водохранилищ как новых географических объектов планетарного масштаба.

Водоохранилища – очень сложные объекты. Решая многие водохозяйственные проблемы и устраняя или смягчая противоречия между требованиями, предъявляемыми к водным ресурсам различными отраслями водного хозяйства, которые не могут быть удовлетворены в естественных условиях стока рек, водохранилища порождают новые противоречия между отраслями хозяйства, и особенно между их целевым назначением и побочными, нередко нежелательными последствиями как для природы, так и для хозяйства районов, затрагиваемых воздействием водохранилищ.

Создание водохранилищ – один из немногих видов деятельности человека, ведущий к быстрым, многообразным и глубоким преобразованиям природы и хозяйства.

Географические условия районов создания водохранилищ оказывают определяющее влияние на хозяйственное значение и эффективность водохранилищ, на выбор их параметров, направление и интенсивность развития различных природных процессов, на мероприятия по подготовке водохранилищ, на состав компонентов водохозяйственного комплекса, режим эксплуатации водохранилищ и т.п.

Как отдельные водохранилища, так и их каскады непрерывно изменяются во времени. Эти изменения происходят под воздействием природных процессов и антропогенных факторов. Поэтому при проектировании, подготовке и эксплуатации водохранилищ, начиная с выбора параметров и кончая установлением режима работы, все должно быть подчинено условиям рационального использования водохранилищ на каждом прогнозируемом этапе развития хозяйства.

Водоохранилища, созданные людьми, подчиняются закономерностям формирования и развития, присущим естественным водоемам, но вместе с этим на все процессы, протекающие в водохранилищах, большое влияние оказывает деятельность человека, и прежде всего задаваемый им режим эксплуатации.

Наряду с отрицательным воздействием на земельные фонды (затопление, подтопление, переформирование берегов) водохранилища, особенно ирригационные и противопаводковые, создают возможности для увеличения и улучшения использования земельных фондов. Немаловажное значение в приросте сельскохозяйственной продукции может сыграть рациональное использование мелководий.

Влияние физико-химических и биологических процессов, происходящих в водохранилищах, на качественный состав поверхностных вод разносторонне и изменяется во времени. Это влияние определяется соотношением процессов различной направленности. Поэтому изменение стока химических веществ реки после прохождения ее вод через водохранилища неоднозначно, в том числе и в разные сезоны года.

Многогранность и внутренняя противоречивость водохранилищ, сложные закономерности их развития, комплексность использования, существенные и многосторонние изменения, вносимые ими в природу, хозяйство, медико-экологические условия жизни населения, и, наконец, большие затраты, связанные с их созданием, требуют придерживаться системного подхода к их проектированию, подготовке и эксплуатации.

Создание каждого водохранилища знаменует собой возникновение новой водной экосистемы со свойственным ей органическим миром и биопродукционными процессами [8].

Практически повсеместная неудовлетворенность водохранилищами объясняется указанными выше объективными и излагаемыми ниже субъективными причинами, среди которых следует назвать: отсутствие глубоких научных исследований в период проектирования (особенно на предварительных стадиях), подготовки и эксплуатации водохранилищ; отсутствие синтеза и анализа многочисленных частных исследований; волевые решения в процессе проектирования, подготовки и эксплуатации водохранилищ; отсутствие необходимого обмена опытом между научными работниками, проектировщиками и изыскателями, как внутри отдельных стран, так и особенно между странами; гигантомания, в результате чего в мире на 10 (0,02%) водохранилищ приходится ~22% их полного объема (в России соответственно на 0,3% водохранилищ – 40% полного объема); недоучет экологических проблем и недостаточная разработанность экологического прогнозирования; игнорирование психологических и частично социальных, медико-биологических и экономических проблем; возложение на водохранилища и их каскады несвойственных им функций по покрытию просчетов и недостатков в работе ряда отраслей хозяйства (покрытие недовыработки электроэнергии на тепловых станциях в связи с авариями и перебоями в доставке топлива, повышенные сбросы воды в нижние бьефы из-за ряда упущений на водном транспорте, в коммунальном водоснабжении и т. п.).

Единой точки зрения на проблему улучшения ситуации в бассейнах зарегулированных рек нет. Имеющиеся предложения могут быть подразделены на три группы: отказ от создания новых водохранилищ и спуск (ликвидация) эксплуатируемых; пересмотр в сто-

рону снижения отметки подпорного уровня существующих водохранилищ; всемерное улучшение проектирования, подготовки и эксплуатации водохранилищ, обратив особое внимание на экологизацию всего процесса их создания и эксплуатации [3].

Углубленные проработки первых двух предложений показали их полную несостоятельность, поскольку спуск водохранилищ, не решая никаких экологических и хозяйственных проблем, приведет к полному разрушению сложившейся системы водоснабжения и водоотведения, электроснабжения, транспорта и др. и тем самым резко ухудшит экологическую, социальную и экономическую ситуации [6].

Единственный способ улучшения положения в бассейнах зарегулированных рек – совершенствование всех технологических звеньев проектирования, подготовки и эксплуатации водохранилищ и воплощение в жизнь концепции рационального использования водохранилищ в условиях растущего антропогенного воздействия, состоящей из трех взаимосвязанных элементов: утверждения статуса водохранилищ как биогеосистемы, главное назначение которой – производство воды надлежащего качества для обеспечения нормального функционирования водных и наземных экосистем; экосистемный подход как на водохранилище, так и на водосборе, особенно в пределах водоохранной зоны, ко всем видам хозяйственной деятельности; осуществление районирования и планировки акваторий и береговых зон водохранилищ в целях улучшения их структурной организации и оптимального обустройства [24].

Проведенные исследования дают основание считать, что решение проблемы рационального использования водохранилищ только экономическими, техническими и юридическими средствами не дало и не может дать должных результатов. Поэтому важной составной частью концепции рационального использования водохранилищ и водных ресурсов в целом должно стать экономическое осмысление всех составляющих элементов культуры в самом широком смысле этого слова, в первую очередь, таких как мораль и нравственность.

Особое и непрестанное внимание должно уделяться формированию в сознании широких кругов населения разумного отношения к

рациональному использованию водных ресурсов. Для этого необходимо создать разветвленную программу воспитания, образования и просвещения населения всех возрастных групп и слоев общества, вплоть до лиц, принимающих политические и хозяйственные решения. Большую роль в этом случае могут сыграть научно-популярная литература и выступления ученых на телевидении, радио и в средствах массовой печати. Общество должно осознать, что культура, мораль и нравственность – существенные экономические факторы, дающие возможность в кратчайшие сроки и с наименьшими затратами денежных средств решить многие хозяйственные, экологические и водные проблемы.

Итог работы сотрудников ИВП по данной тематике – несколько десятков монографий и брошюр и сотни статей, опубликованных в журналах.

В первую очередь результаты исследований публиковались в журналах «Водные ресурсы», «Известия АН СССР, серия географическая», «Вестник АН СССР» и других, в книгах издательств «Наука», «Энергия», «Виктор». До инженерной общественности результаты исследований доводились публикациями в журналах «Гидротехническое строительство», «Гидротехника и мелиорация», в обзорных информационных Минводхоза СССР. Для студентов высшей школы они были опубликованы в ряде учебников и учебных пособий, для учащихся школ – в журнале «География в школе» и газете «География», для широких кругов общественности – в журналах «Природа», «Энергия», «Наука и жизнь», «Военные знания», в брошюрах издательства «Знание», в сериях «Науки о земле: новое в жизни, науке, технике», «Земля людей» и «Человек и природа», а также в научно-популярных книгах издательств «Наука» и «Мысль». Статьи были опубликованы также в центральных, республиканских и областных газетах и в газете «Вода России».

В заключение следует отметить, что академические институты СССР, России и СНГ начиная с 50-х гг. XX в. приняли активное участие в исследованиях экологических, социальных и хозяйственных проблем, связанных с созданием, рациональным использованием и эксплуатацией водохранилищ.

Наибольший вклад в решение этих проблем внесли ИВП, ИБВВ, Институт географии, а в последние годы Институт водных и эколо-

гических проблем СО РАН и Институт экологии Волжского бассейна [36]. Большой вклад в исследование водохранилищ внес Институт гидробиологии Украинской академии наук. Отдельные исследования переформирования берегов, подтопления, изменения почвенного покрова, растительности, животного мира, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических проблем водоемов проводили также многие другие институты АН СССР, России и СНГ.

Большой вклад в исследование водохранилищ внес и Гидрологический институт Госкомгидромета, многие проектные институты, и в первую очередь Гидропроект, Гидроэнергопроект, Союзводопроект, Гипроречтранс.

Неоценимый вклад в исследование водохранилищ внесли Пермский (Ю.М. Матарзин, И.А. Печеркин, Т. П. Девяткова, И.К. Мацкевич и др.), Московский (С.Д. Муравейский, К.К. Эдельштейн и др.), Санкт-Петербургский (Ю.С. Васильев и др.), Минский (В.М. Широков и др.), Тверской (А.Г. Емельянов и др.) университеты.

Выводы

К основным достижениям ученых РАН в рассматриваемой области следует отнести:

- осуществление системной оценки создания водохранилищ в XX в. в масштабе земного шара, отдельных континентов и стран;
- разработку системной оценки экологических, социальных и экономических последствий создания водохранилищ и их влияния на окружающую среду;
- систематизацию, анализ и критическое рассмотрение предлагаемых подходов к решению проблемы улучшения экологической ситуации в бассейнах рек, зарегулированных водохранилищами;
- разработку и обоснование концепции рационального использования водохранилищ в условиях растущего антропогенного пресса;
- исследование и прогноз взаимодействия крупных зарегулированных речных систем с окружающей средой и обоснование направлений их эффективного использования;
- исследование и прогноз воздействия измененных гидрогеологических условий на окружающую среду;
- исследование и прогноз закономерностей развития экологически дестабилизированной наземной среды при антропогенных

изменениях гидрологического и гидрогеологического режимов вод суши;

- изменение природных условий Каспийского и Азовского морей под влиянием зарегулирования стока на их гидрофизический, гидрохимический и гидробиологический режимы;
- детальные исследования гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов на отдельных водохранилищах и их каскадах.

По-видимому, целесообразно создать творческий коллектив из представителей институтов РАН, внесших наибольший вклад в исследование водохранилищ и их воздействия на окружающую среду, для создания полноценной монографии по этой теме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б. Проблемы создания и комплексного использования водохранилищ в СССР // Вод. ресурсы. 1972. №1. С. 119.
2. Авакян А.Б. Водохранилища и окружающая среда. М.: Знание, 1982. 48 с.
3. Авакян А.Б. Экологизация водных проблем // Земля и люди. М.: Знание, 1983. С. 162.
4. Авакян А.Б. Водохранилища СССР и задачи их исследования // Вод. ресурсы. 1987. №6. С. 54.
5. Авакян А.Б. Современные проблемы создания и комплексного использования водохранилищ // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. М.: ВИНТИ, 1990. №3. С. 20.
6. Авакян А.Б. Народнохозяйственные и экологические последствия спуска водохранилищ // Гидротехн. стр-во. 1991. №8. С. 1.
7. Авакян А.Б. Вопросы создания и рационального использования водохранилищ // Воды суши: проблемы и решения. М.: РАН ИВП, 1994. С. 414.
8. Авакян А.Б. Водохранилища – новые географические объекты XX в. М., 1997. Вып. 5. С. 6.
9. Авакян А.Б., Вендров С.Л., Преображенский Л.Ю. Проблемы рационального использования озер и водохранилищ // Генеральные доклады V Всесоюзного гидрологического съезда. Д.: Гидрометеиздат, 1986. С. 107.
10. Авакян А.Б., Веницианов Е.В., Кочарян А.Г., Софронова К.И. Современное состояние и проблемы охраны качества воды в бассейне Волги // Вод. ресурсы. 1994. Т. 21. №4. С. 471.
11. Авакян А.Б., Ковалевский В.С. О влиянии техногенных изменений режима вод суши на окружающую среду // Вод. ресурсы. 1992. №2. С. 140.
12. Авакян А.Б., Кочарян А.Г., Майрановский Ф.Г. Влияние водохранилищ на трансформацию химического стока рек // Вод. ресурсы. 1994. Т. 21. №2. С. 144.

13. Авакян А.Б., Кочарян А.Г., Малютин А.Н., Марголина Г.Л. Оценка роли водохранилищ в изменении качества речных вод // Вод. ресурсы. 1988. №3. С.5.

14. Авакян А.Б., Матарзин Ю.М. Водохранилища и их народнохозяйственное значение. Пермь: Перм. ун-т, 1984. 84 с.

15. Авакян А.Б., Овчинникова С.П. Некоторые данные о водохранилищах мира // Гидротехн. стр-во. 1971. №8. С. 48.

16. Авакян А.Б., Поддубный А.Г., Поддубный С.А. Пути улучшения состояний экосистем водохранилищ и повышения рыбопродуктивности // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25. №3. С. 261.

17. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Водохранилища и земельные ресурсы // Вод. ресурсы. 1988. №5. С. 3.

18. Авакян А.Б., Салтанкин В.П. Улучшение комплексного использования водохранилищ на основе их акваториального районирования, планировки и обустройства. М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1987. Вып. 1,64 с.

19. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А. Водохранилища СССР. Вопросы создания и комплексного использования // Мелиорация и водное хозяйство. Сер. 4. Комплексное использование и охрана водных ресурсов: обзорная информация ЦБНТИ Минводхоза СССР. М., 1985. Вып. 1. 57 с.

20. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.П. Водохранилища. Сер. Природа мира. М.: Мысль, 1987. 325 с.

21. Авакян А.Б., Шарапов В.А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. М.: Энергия, 1962. 152 с.; 1968. 384 с.; 1977. 399 с.

22. Авакян А.Б., Шарапов В.А. Основные направления научных исследований в области создания и комплексного использования водохранилищ // Проблемы изучения и использования водных ресурсов. М.: Наука, 1972. С. 84.

23. Авакян А.Б., Широков В.М. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Минск: Университетское, 1990. 240 с.

24. Авакян А.Б., Широков В.М. Рациональное использование и охрана водных ресурсов. Екатеринбург: Виктор, 1994. 319 с.

25. Авакян А.Б., Яковлева В.Б. Рекреационное использование водохранилищ // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1970. №6. С 37.

26. Биологические ресурсы водохранилищ. М.: Наука, 1984. 279 с.

27. Буторин Н.В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Д.: Наука, 1969. 323 с.

28. Васильев Ю.С. Влияние плотин и водохранилищ на окружающую среду. М.: Энергоатомиздат, 1982. 142 с.

29. Вендров С.Л. Проблемы преобразования речных систем СССР. Д.: Гидрометеоиздат, 1970. 207 с.

30. Вендров С.Л., Дьяконов К.Н. Водохранилища и окружающая природная среда. М.: Наука, 1979. 136 с.

31. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 368 с.

32. Водохранилища мира. М.: Наука, 1979. 287 с.
33. Драчев С.М. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. М.: Наука, 1964. 274 с.
34. Матарзин Ю.М., Богословский Б.Б., Мацкевич И.К. Учебное пособие по водохранилищам. В 4-х выпусках. Пермь: Перм. ун-т, 1977.
35. Рекреационное использование водохранилищ: проблемы и решения. М.: Наука, 1989. 152 с.
36. Розенберг Г.С., Краснощеков Г.П. Волжский бассейн: экологическая ситуация и пути рационального природопользования. Тольятти, 1996. 249 с.
37. Салтанкин В.П. Перспективы применения дистанционных методов для изучения водохранилищ// Тр. координац. совещ. по гидротехнике. 1977. Вып. 122. С. 129.
38. Шарапов В.А. Влияние регулирования стока рек водохранилищами на природу и хозяйство районов в нижних бьефах // Вод. ресурсы. 1968. №73. С. 136.
39. Широков В.М. Формирование берегов и ложа крупных водохранилищ Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. 172 с.
40. Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
41. Avakyan A.B., Jakovleva V.B. Status of Global Reservoirs: The Position in the Late Twentieth Century // Lakes and Reservoirs: Research and Management. 1998. №3. P. 45.

Наводнения. Концепция защиты¹

А.Б. Авакян

Общеизвестно, что состояние и развитие как биосферы, так и человеческого общества находятся в тесной зависимости от состояния водных ресурсов. В последние десятилетия среди проблем, стоящих перед человечеством, все большее и большее число специалистов и политических деятелей под №1 называют проблему воды.

Водные проблемы возникают в четырех случаях: 1) когда воды нет или ее недостаточно; 2) когда качество воды не удовлетворяет социальным, экологическим и хозяйственным требованиям; 3) когда режим водных объектов не соответствует оптимальному функционированию экосистемы, а режим подачи воды потребителям не отвечает социальным потребностям населения и нормальному функционированию хозяйственных объектов; 4) когда воды много, и обжитые и застроенные территории страдают от наводнений.

Небезынтересно отметить, что в глобальном аспекте первые три проблемы порождены уходящим XX веком, а четвертая сопутствует человеческому обществу с древнейших времен.

Наводнения в прошлом. Легенды о великом потопе, в котором погибло почти все человечество, распространены по всему миру. Многие исследователи полагают, что значительная часть преданий о потопе основывается на действительно происшедших катастрофах в разных районах земного шара на протяжении нескольких последних тысячелетий.

Исследованиями археологов, биологов, историков и этнографов установлено, что в первой половине IV и III тыс. до н.э. в Месопотамии произошли грандиозные наводнения. Населению, проживавшему в долине Тигра и Евфрата, обжитые ими районы между горами и пустыней, представлялись целым миром. Поэтому катастрофические наводнения, в которых погибла большая часть жителей долины, у немногих оставшихся в живых ассоциировались с всемирным потопом. Высказываются предположения, что именно одно из этих наводнений, о котором говорится в Шумерской легенде, послужило основанием для сюжета о всемирном потопе в Ветхом завете.

¹ Авакян А.Б. Наводнения. Концепция защиты. // Известия РАН. Серия географическая. 2000. №5. С. 40–46

Историю потопа историки и поэты излагают каждый на свой лад. В тексте библейской легенды о всемирном потопе в новом переводе С. Апта, опубликованном в 1973 г. издательством «Художественная литература» в книге «Поэзия и проза Древнего Востока», в частности, говорится: «И был на земле ливень сорок дней и сорок ночей. И Господь затворил за ними ковчег снаружи. И сорок дней был потоп на земле, и вода, прибывая, подняла ковчег высоко над землей. Умерло все, в чем было на суше дыхание жизни. Так, стер он все сущее на земле. От человека до скота, до гадов ползучих, до птиц небесных – все было стерто с лица земли, и остался лишь Ной и те, что с ним были в ковчеге» [9].

Историками, археологами и другими специалистами проделана большая работа по исследованию сказаний о великом потопе в разных странах. Упоминаются Вавилонское, Еврейское, Древнегреческое, Древнеиндийское сказания, а также потопа в Восточной Азии, на островах Малайского архипелага, в Австралии, в Новой Гвинее и Меланезии, в Полинезии и Микронезии, в Южной, Центральной и Северной Америке, в Мексике, Африке [4]. По перечню этих сказаний можно судить, что крупные наводнения, как и в наше время, происходили практически во всех районах земного шара.

Основное отличие нашего времени от ушедших веков заключается в том, что с ростом населения, сведением лесов и развитием многих других видов деятельности человека наводнения, в том числе и разрушительные, стали происходить все чаще и чаще. Очень интересные данные приводит в своем докладе, сделанном на международном научно-промышленном форуме «Великие реки-99» в Нижнем Новгороде, Ли Луканг [6]. Основываясь на этом докладе и других литературных источниках, с полным основанием можно говорить о том, что история Китая – это в некоторой степени история борьбы с наводнениями. С проблемой наводнений жители страны сталкивались при всех феодальных династиях.

На р. Хуанхэ в период с XXI по XVI в. до н. э. катастрофические наводнения происходили примерно каждые 50 лет. Затем их частота начала расти от века к веку. В период с 206 г. до н. э. по 25 г. н. э. в правление династии Хэн было отмечено 12 наводнений с интервалом в 20 лет. С 618 по 907 г. н. э. в период правления династии Тэн произошло 31 наводнение с интервалом в 9 лет. С 1368 по 1644 г. в

правление династии Минг было 454 наводнения с интервалом в 0,6 года. В период династии Кинг с 1644 по 1911 г. было отмечено 480 наводнений с интервалом 0,55 года. Не столь стремительно, как на Хуанхэ, росла частота наводнений и на р. Янцзы [6].

Еще более впечатляют цифры стремительного роста ущерба от наводнений. Так, в начале XX столетия среднегодовой ущерб от наводнений в США составил 100 млн долл., во второй половине столетия он превышал 1 млрд долл., а в отдельные годы последнего десятилетия – 10 млрд долл.

Причины наводнений. В статье, опубликованной нами совместно с А.А. Полюшкиным [2], подробно охарактеризованы природные и антропогенные причины возникновения наводнений. Напомним лишь, сколь широк диапазон причин, вызывающих наводнения. В большинстве районов земного шара наводнения вызываются ливнями, интенсивными и затяжными дождями, бурным таянием снегов, в результате прохождения циклонов. На реках Северного полушария зимние наводнения обусловлены зажорами и заторами льда. Предгорья и высокогорные долины нередко подвергаются наводнениям, связанным с прорывами внутриледниковых и завальных озер. В приморских районах нередко нагонные наводнения и цунами.

В последние столетия, в особенности в XX в., все большую роль в увеличении частоты и разрушительной силы наводнений играют антропогенные факторы. Среди них в первую очередь следует назвать сведение лесов (максимальный поверхностный сток возрастает на 250–300%), нерациональное ведение сельского хозяйства (в результате снижения инфильтрационных свойств почв, по некоторым расчетам, в центральных районах России с IX по XX в. поверхностный сток увеличился в 4 раза и резко возросла интенсивность паводков). Значительно усилили интенсивность паводков и половодий продольная распашка склонов, переуплотнение полей при использовании тяжелой техники, переполив в результате нарушения норм орошения. Примерно втрое увеличились средние расходы паводков на урбанизированных территориях в связи с ростом водонепроницаемых покрытий и застройкой. Существенное увеличение максимального стока связано с хозяйственным освоением пойм, служащих природными регуляторами стока. Нередко формирование наводнений связано с неправильным и некачественным

осуществлением паводкозащитных мер, приводящих к прорыву дамб обвалования, разрушению искусственных плотин, аварийным сработкам водохранилищ и др.) [2, 7, 8, 10, 11].

По нашим примерным расчетам, общая площадь земель, подверженных в те или иные периоды затоплению, составляет на земном шаре около 3 млн км², в том числе в России примерно 400 тыс. км², в Китае – 600 тыс., в США – 280 тыс., в Индии – 250 тыс., в Бразилии – 300 тыс. км². На территориях, подверженных периодическому затоплению, проживает около 1 млрд чел.

Как это ни парадоксально, одно из величайших бедствий человечества, сопровождающее его жизнь на протяжении многих тысячелетий, – это то, что до сего времени нет не только общепринятой концепции борьбы с наводнениями, но и сколь-либо достоверного учета причиняемых ими последствий [1, 5, 10, 11].

За всю историю человечества написаны сотни книг и тысячи статей с описанием тех или иных наводнений. Многие из них живут в памяти людей столетия, поскольку причиненные ими разрушения и число погубленных людей сопоставимы с самыми кровопролитными войнами. Одно из самых катастрофических наводнений произошло в 1332 г. в Китае на р. Хуанхэ. В результате наводнения и свирепствовавшей в последующие годы «черной смерти» (чумы) погибло 7 млн человек. Не менее крупное наводнение произошло осенью 1887 г. Было затоплено 11 городов и 300 деревень. По официальным данным, наводнение унесло жизни 900 тыс. человек, а по данным неофициальных источников, жертвами наводнения стали от 2 до 6 млн человек, включая тех, кто погиб после наводнения от различных заболеваний, голода, телесных повреждений [7].

Описанием наводнений в разных странах мира, в результате которых гибли десятки и сотни тысяч человек, можно было бы заполнить многие тома книг. Но картины, дающей представление о наводнениях в масштабе земного шара, проходивших в прошлые годы, нет ни в одном литературном источнике.

Наводнения в современном мире. Впервые это стало возможным сделать благодаря работе, проводимой коллективом Дартмутской обсерватории при Ганноверском колледже в США [1]. Начиная с 1996 г. и по настоящее время сотрудники этой обсерватории собирают данные о наводнениях, используя самые разные источники:

официальные правительственные сообщения, данные метеорологических служб, телевизионные и радио новости, газетные и журнальные материалы [12].

Учитывая разнохарактерность материалов, полученных по отдельным странам из разных источников и основанных на различных методиках расчета ущерба от наводнений, а также неполноту приводимых сведений по отдельным странам, в настоящее время нет оснований утверждать, что обработанные материалы дают адекватную картину бедствий, причиненных наводнениями 1997–99 гг. Но первые шаги в этом направлении, несомненно, сделаны. На основании обработанных нами совместно с М.Н. Истоминой данных по 339 наводнениям, происшедшим в мире за эти три года, следует, что от них погибло более 170 тыс. чел., свыше 150 млн были временно эвакуированы из своих жилищ, а общий ущерб от наводнений превысил 250 млрд долл. Очень важно, чтобы мировое сообщество не прекращало и год от года совершенствовало методику сбора данных о наводнениях в разных странах. Все государства должны уделить внимание этой проблеме. Необходимо под эгидой соответствующих организаций ЮНЕСКО выработать единую согласованную представителями всех стран методику подсчета последствий ущерба от наводнений.

Поскольку о числе жертв при стихийных бедствиях сообщают многие средства массовой информации, проявляющие к этому большой интерес, можно полагать, что цифры, указывающие число погибших в большинстве стран мира в период наводнений, достаточно достоверны. Существенные сомнения имеются лишь по Нигерии, однако уточнить число погибших в этой стране в настоящее время нам не представилось возможным. Менее надежны данные о временно эвакуированных из зон затопления. Но приводимый порядок цифр особых сомнений не вызывает. Мы не приводим данные о площадях затопления, поскольку они в работе Дартмутской обсерватории имеются менее чем по одной трети наводнений и к тому же в ряде случаев характеризуют не общую площадь затопления, а площадь сельскохозяйственных, в большинстве случаев лишь пахотных угодий, на которых погиб урожай [12].

К данным об ущербе от наводнений также следует относиться с большой осторожностью, так как неизвестна методика его подсчета в разных странах. В большинстве случаев учитывается прямой

ущерб, связанный с непосредственным физическим контактом паводковых вод с хозяйственными объектами, величина которого определяется затратами на восстановление хозяйства или текущей рыночной стоимостью разрушенных (или нарушенных) хозяйственных объектов. Таким же образом оценивается ущерб от нарушения или разрушения хозяйственных и жилых построек и имущества, находящегося в них, а также от разрушения мостов, автомобильных и железных дорог, линий связи и электропередачи, газо- и нефтепроводов [3].

В сельском хозяйстве ущерб определяется в большинстве случаев потерями сельскохозяйственной продукции, затратами на восстановление нарушенного плодородия почв. Сюда также относят затраты на выплаты по страхованию имущества в случае стихийных бедствий, единовременные выплаты денежных и натуральных пособий, а также затраты на организацию спасательных мероприятий, включающих эвакуацию населения и вывоз материально-технических ценностей, строительство временных защитных сооружений и т.п.

Значительно реже определяется и учитывается косвенный ущерб, который представляет собой потери из-за нарушения хозяйственных связей, спада производства, торговых и банковских операций и т. п. [3]. Косвенный ущерб, общепринятых методик подсчета которого до сих пор еще не разработано, может сказываться точно так же, как и прямой, в течение многих лет после наводнения. Поэтому мы полагаем, что приводимые цифры ущерба можно считать скорее заниженными, нежели завышенными.

Обработка и анализ данных, приведенных сотрудниками обсерватории при Ганноверском колледже, дают возможность с достаточной степенью достоверности утверждать о количестве наводнений, имеющих место в 1997–99 гг., об их распределении по материкам (рис. 1), месяцам (рис. 2) и о продолжительности наводнений (рис. 3). Полагаем, что из приведенных диаграмм читатель получит о них достаточно полное впечатление. Анализ наводнений за последнее столетие, проведенный во многих странах, показал, что во всем мире, включая Россию, наблюдается тенденция значительного роста ущербов от наводнений, вызванная нерациональным ведением хозяйства в долинах рек, усилением хозяйственного освоения паводкоопасных территорий.

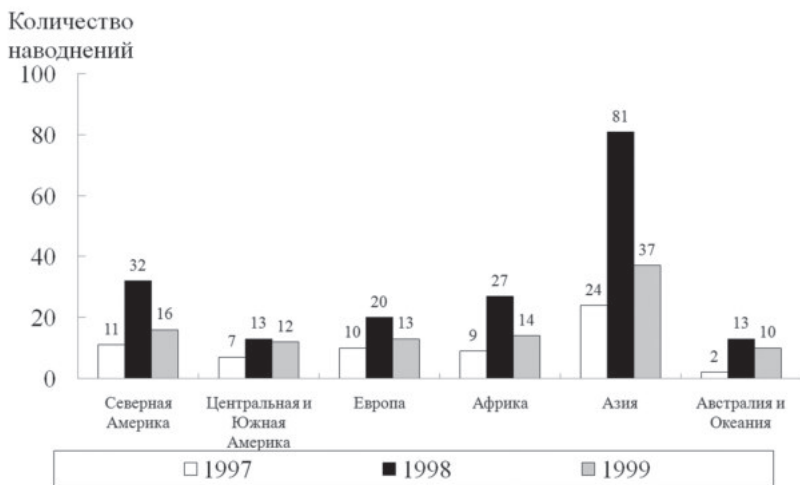


Рис. 1. Распределение наводнений по континентам в 1997–99 гг.

Концепция защиты от наводнений. Прогнозируемое потепление климата и неизбежный рост хозяйственного освоения речных долин, несомненно, приведут к увеличению повторяемости и разрушительной силы наводнений. Поэтому неотложной задачей правительств всех стран мира, различных органов местной власти стала разработка действенных мер предотвращения и защиты от наводнений. Следует не забывать, что предотвращение стихийных бедствий в 50–70 раз уменьшит затраты на ликвидацию последствий наводнений. Нам представляется, что реализация предлагаемой нами концепции может сыграть значительную роль в уменьшении бедствий и ущерба, вызываемых наводнениями. В этом плане несомненную роль играет выполнение каждого пункта предлагаемой концепции, но существенный эффект может быть достигнут только при полной реализации предлагаемых мер и действий.

1. При хозяйственном освоении паводкоопасных территорий как в долинах рек, так и на морских побережьях, страдающих от нагонных наводнений и цунами, следует проводить детальные технико-экологические исследования. Их цель – выявление путей получения максимально возможного экономического эффекта от освоения этих территорий и вместе с тем сведение к минимуму возможного ущерба от наводнений. Выявление оптимального решения этой

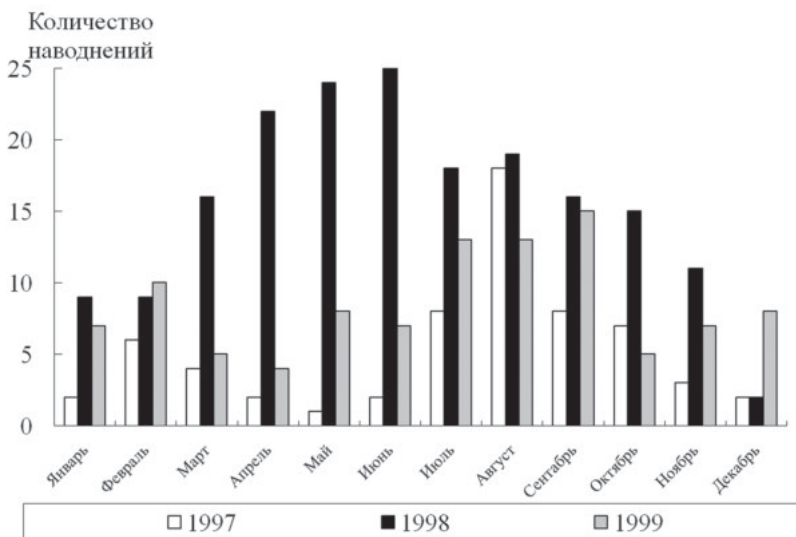


Рис. 2. Распределение наводнений 1997–99 гг. на земном шаре по месяцам

сложнейшей задачи и неуклонное следование в практической деятельности его осуществления – надежный фундамент, на котором базируются все остальные перечисляемые ниже положения концепции.

2. При разработке противопаводковых мероприятий в долинах рек следует рассматривать весь водосбор, а не его отдельные участки, поскольку локальные противопаводковые мероприятия, не учитывающие всю ситуацию прохождения паводка в долине реки, могут не только не дать экономического эффекта, но и существенно ухудшить ситуацию в целом и привести в результате к еще большому ущербу от наводнения.

В этом отношении характерен пример последствий, предпринятых во второй половине XIX в., мер по защите от наводнений территорий в среднем и нижнем течении р. Тисса в Венгрии. Для увеличения пропускной способности в период прохождения паводков русло реки в особенно извилистых местах было спрямлено и углублено, в результате чего длина его сократилась на 480 км. Участки, не охваченные русловыправительными работами, были обвалованы. Во время паводка в 1879 г. углубленные и спрямленные участки Тиссы пропустили гораздо больший объем вод, нежели в естественных

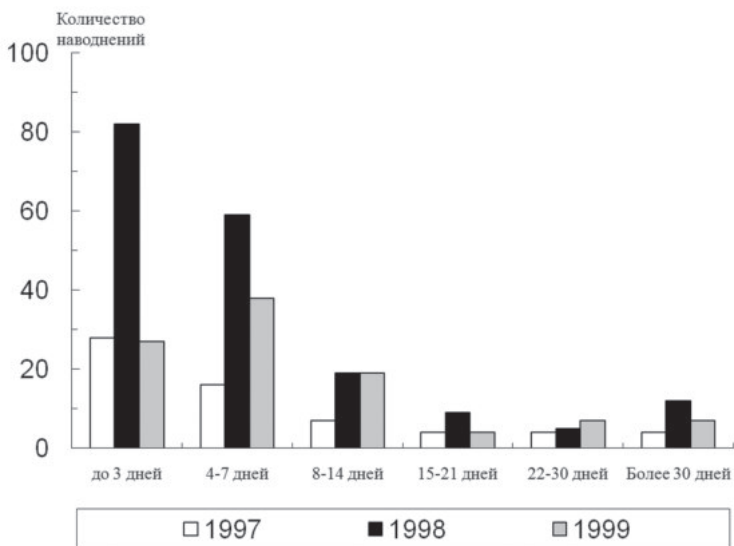


Рис. 3. Распределение наводнений 1997–99 гг. на земном шаре по продолжительности стояния уровня воды

условиях. Однако в неуглубленных и неспрямленных участках, где пропускная способность русла осталась прежней, уровень воды резко повысился. В результате нагрузка на дамбы обвалования превысила проектную и они во многих местах были прорваны. Это привело к затоплению огромной территории. Особенно сильно пострадал г. Сегед, практически полностью разрушенный наводнением [2].

3. Необходимо умело сочетать инженерные методы защиты (регулирование стока водохранилищами, строительство дамб обвалования приречных территорий, спрямление и углубление речного русла в целях ускорения стока паводковых вод, строительство каналов для отвода вод в естественные понижения рельефа, подсыпка территорий и др.) с неинженерными. К последним относятся разработка экономических и юридических норм с учетом особенностей использования паводкоопасных территорий. К ним в первую очередь принадлежат: ограничение или полное запрещение таких видов хозяйственной деятельности, в результате которых возможно усиление наводнений (сведение лесов и др.), а также расширение мероприятий, направленных на создание условий, ведущих к умень-

шению стока (применение зяби, сток с которой меньше, чем со стерни или залежи в зависимости от географических условий в 2–3 раза, переход на безотвальную обработку почвы и др.). Кроме того, должны выбираться и осуществляться такие виды хозяйственной деятельности, которым при затоплении будет нанесен наименьший ущерб.

4. Инженерные сооружения по защите земель и хозяйственных объектов должны быть надежны, и вместе с тем их осуществление должно быть связано с минимальными нарушениями природной среды. Так, в комплексе мер проекта «Дельта» в Нидерландах грандиозные работы проводились при перекрытии дельты Восточной Шельды – ее ширина 9 км и глубина 40 м. По первоначальному проекту намечалось строительство глубокой дамбы. Однако это встретило сильнейшую оппозицию со стороны природоохранной общественности и представителей рыбного хозяйства, поскольку при этом нарушился водообмен между заливом и морем и тем самым экологическое равновесие в заливе, что имело бы крайне отрицательные последствия как для природы, так и для хозяйства. В результате в 1976 г. после дополнительных исследований данная часть проекта была пересмотрена и переделана. Технические осложнения проекта привели к удорожанию работ почти в 3 раза, но зато был обеспечен беспрепятственный водообмен между морем и заливом при его надежной защите от нагонов.

5. Должно быть осуществлено четкое районирование и картирование пойм с нанесением границ паводков и половодий различной обеспеченности. С учетом вида хозяйственного использования территории рекомендуется выделить зоны с 20%-ной обеспеченностью паводка (для сельскохозяйственных угодий), 5%-ной – для строений в сельской местности, 1%-ной – для городских территорий и 0,3%-ной – для железных дорог. Само собой разумеется, что в разных природных зонах и экологических районах число зон и принципы их выделения могут в какой-то степени измениться. Однако практически везде участки поймы, затопляемые чаще, чем один раз в 5 лет, могут использоваться только для косьбы сена.

Разработка и издание карт паводкоопасных территорий помимо их прямого назначения окажут существенную помощь экспресс-оценкам ущербов от каждого текущего наводнения, в том числе и

оценкам затопления земель, которые в настоящее время отсутствуют по большей части наводнений.

6. В стране должна существовать четко работающая система по прогнозированию паводков и извещению населения о времени наступления наводнения, о максимально возможных отметках его уровня и продолжительности в сутках. Прогнозирование паводков и половодий должно осуществляться на основе развития широкой службы наблюдений за гидрометеорологической обстановкой (следует заметить, что за последние годы произошло значительное сокращение наблюдательных постов гидрометеослужбы). Необходимо непрерывно обеспечивать гидрометеослужбу современным оборудованием – автоматизированными системами сбора и обработки информации, использовать радарные установки и искусственные спутники.

7. Важное значение следует уделять заблаговременному информированию населения о возможности наводнения, разъяснению о вероятных его последствиях и мерах, которые следует предпринимать в случае затопления строений и сооружений. Для этого следует широко использовать телевидение, радио и другие средства информации. В паводкоопасных районах должна быть широко развернута пропаганда знаний о наводнениях. Все государственные структуры, а также каждый житель должны ясно представлять, что им надлежит делать до, в период и после наводнения.

8. Весьма важны разработка и дальнейшее совершенствование методик расчета как прямых, так и косвенных ущербов от наводнений. Объективное определение ущерба от наводнений имеет важнейшее значение для правильного выбора стратегии и тактики борьбы с этим стихийным бедствием. Точная оценка потерь как фактических и возможных как в период, так и после наводнения (из-за нарушения транспортных связей, снижения урожайности полей, увеличения расходов по линии здравоохранения и т.п.) позволяет выбрать оптимальный вариант мероприятий по предотвращению и ликвидации нарушений и ущербов, вызываемых наводнениями. Определение ущербов очень важно, в частности, для оценки экологической целесообразности и эффективности систем инженерной защиты, а также страхования населения и юридических лиц.

9. Регулирование использования паводкоопасных территорий должно быть прерогативой регионов: республик, краев, областей, районов и городов. Государство может направлять и стимулировать их деятельность лишь принятием тех или иных законов о регулировании землепользования.

10. В систему мероприятий по защите от наводнений должны быть включены как государственные и общественные организации, так и частные лица. Успешная работа такой системы должна координироваться и направляться центральным органом на федеральном уровне.

11. Наилучшим инструментом по регулированию землепользования на паводкоопасных территориях может быть гибкая программа по страхованию от наводнений, сочетающая как обязательные, так и добровольные его формы. Основной принцип этой программы состоит в следующем: в случае принятия рационального с позиций противопаводковой защиты вида использования территории страхователю выплачивается существенно бóльшая страховая сумма, чем в случае игнорирования соответствующих рекомендаций и норм. Программа страхования должна состоять из двух разделов: обязательного и добровольного страхования. Это вытекает из самого феномена наводнений и связанных с ними последствий. Ущерб, причиняемый наводнениями, может быть четко подразделен на три категории:

А. Ущерб, затрагивающий интересы общества и государства, нередко далеко выходящий по своему значению за пределы района, непосредственно затронутого затоплением. Это ущерб, вызываемый затоплением железных и шоссейных дорог, линий электропередачи и связи, трубопроводов, а также промышленных предприятий, технологически тесно связанных со многими предприятиями страны. Нарушение их работы вносит дезорганизацию в нормальное функционирование хозяйственных объектов во многих регионах, непосредственно не затрагиваемых наводнениями. Естественно, что экономическая необходимость незамедлительного восстановления подобных объектов требует больших средств и обязательного страхования.

Б. Ущерб жилому фонду и предприятиям, обеспечивающим жизнедеятельность населения в районах затопления. Поскольку государство не может допустить, чтобы его граждане оставались без

крыши над головой, без снабжения хлебом и другими продуктами первой необходимости, оно вынуждено иметь средства на восстановление указанных объектов, поэтому страхование и в этом случае должно быть обязательным.

В. К этой категории относится ущерб, причиненный личному имуществу физических лиц (мебели, одежды и т.п.), их подсобным постройкам (склады, сараи, хлева, бани и т.п.) и находящемуся в них имуществу. Страхование в этом случае может быть добровольным.

Осуществление указанной программы страхования будет стимулировать скорейшее издание карт паводкоопасных зон с выделением границ затопления паводками различной обеспеченности. Оно будет способствовать осуществлению регулирования хозяйственного развития в пределах каждой зоны повышенной опасности, а также проведению ряда мероприятий, таких как подготовка передвижных домиков, создание резервной системы водоснабжения и канализации, резервов стройматериалов, спасательной техники, горючего и провианта, подготовке общественных групп (бригад) экстренной помощи в период наводнения и т. п.

12. Комплекс мероприятий в паводкоопасных районах, включающий прогнозирование, планирование и осуществление работ, должен проводиться до наступления наводнения, в период его прохождения и после окончания стихийного бедствия.

Задачи дальнейших исследований и выводы. Нам представляется, что детальная разработка названных выше положений концепции – неотложная задача ряда научно-исследовательских и проектных институтов ряда министерств, и в первую очередь МЧС.

К числу первоочередных задач в области изучения наводнений следует отнести разработку и осуществление единой методики учета последствий от наводнений и подсчета причиняемого ими ущерба. При этом следует уточнить методику расчета прямого ущерба и разработать методику косвенного. Следует разработать методику и учитывать ущерб, вызываемый изменениями в природной среде: морфологии долины, почвенном покрове, растительности, животном мире, качестве воды. Следует разработать методику учета ущерба, наносимого здоровью людей в период и после завершения наводнений.

Необходимо исследовать факторы, ведущие к росту наводнений, в особенности катастрофических, в XXI в. В числе этих факторов основными будут: изменение климата (увеличение осадков, таяние льдов и повышение уровня океана и др.), дальнейший рост хозяйственного освоения речных долин в связи с ростом населения.

Особые проблемы возникают в долинах тех рек, русла которых ограждены дамбами, и дно которых возвышается подчас на многие метры над поймами и надпойменными террасами (Хуанхэ, Янцзы и др.) [13].

Необходимы дальнейшие уточнения концепции защиты от наводнений с учетом широкого спектра экологических, социальных, технических, культурно-просветительных и медицинских мероприятий, подлежащих осуществлению в паводкоопасных районах в периоды до, в процессе и после окончания наводнений.

Мы показали, что наводнения сопутствуют человеческому обществу с древнейших времен и до наших дней. В силу разных причин они происходят в бассейнах всех рек земного шара, а также на значительных участках побережий океанов и морей (нагонные наводнения, цунами). Площадь территорий, подверженных наводнениям, на земном шаре составляет в настоящее время около 3 млн км², на которых проживает до 1 млрд чел. За последнее время, особенно во второй половине XX в., растут причины наводнений антропогенного характера и размеры причиняемых ими ущербов. За исторический период четко прослеживается рост интенсивности и разрушительной силы наводнений природного характера.

По числу жертв и ущербу, причиненному обществу, наводнения занимают первое место среди стихийных бедствий. Вместе с тем, как это ни парадоксально, до сего времени нет надежных долгосрочных прогнозов их появления, достоверных и общепринятых методик подсчета причиняемых ими ущербов и общепринятой концепции защиты.

В перспективе в силу ряда природных и антропогенных причин причиняемые наводнениями ущербы будут расти. Поэтому насущно необходимо усилить научно-исследовательские, организационные и практические работы, направленные на уменьшение ущербов от наводнений.

Предлагаемая нами концепция защиты от наводнений может служить основой для дальнейших детальных разработок в этом направлении. Особое и безотлагательное внимание ученых, проектировщиков и государственных деятелей должно быть уделено тем районам, где из-за системы береговых дамб дно рек выше окружающей местности, поскольку без малейшего преувеличения можно утверждать, что население этих районов живет на вулкане.

Учитывая глобальный масштаб проблемы, ее исследованию и практическому решению должно быть уделено самое серьезное внимание правительств всех стран и международных организаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения как явление глобального масштаба // Водное хозяйство России. 1999. Т. 1. №3. с. 296–304.

2. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Влияние наводнений на жизнь общества и защиты от них // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1989. №2. С. 42–54.

3. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Наводнения. Проблемы определения ущербов и защиты // Водные ресурсы. 1991. №4. С. 114–125.

4. Дж. Дж. Фрейзер. Фольклор в ветхом завете. М.: Издательство политической литературы, 1986. 510 с.

5. Катастрофы конца XX в. / Под ред. В.А. Виноградова. М.: УРСС, 1998. 398 с.

6. Ли Луканг. Анализ катастрофических наводнений в бассейне р. Янцзы в 1998 году // Генеральные доклады по проблемам экологического оздоровления великих рек мира. Т. 1. Н.Новгород: ВАО «Нижегородская Ярмарка», 1999. С. 349–363.

7. Нежиновский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 183 с.

8. Стихийные бедствия: изучение и методы борьбы. М.: «Прогресс», 1978. 416 с.

9. Хлопин И.Н. А что было до потопа? Л.: Лениздат, 1990. 154 с.

10. Уайт Г. География, ресурсы и окружающая среда. М.: «Прогресс», 1990, 543 с.

11. Destructive water: water-control natural disasters, their abatement and control // JAHS Publ. 1997. №230. P. 1–397.

12. Global Register of Large River Flood Events (1997–1999). Dartmouth Flood Observatory Department of Geography, Dartmouth College. Hanover NH 03755 USA, <http://www.Dartmouth.edu/artsci/geog/floods/>

13. Word R. Floods: a geographical perspective. London – Basingstoke. Mac Millan Press, 1978. 244 p.

Александровский Юрий Владимирович

(9.9.1903 – 30.1.1978)

Юрий Владимирович Александровский – известный учёный, один из крупнейших специалистов в области гидротехники, гидрологии и водного хозяйства, кандидат технических наук, в 1969–74 гг. заместитель директора Института водных проблем АН СССР по научной работе.

Ю.В. Александровский родился 9 сентября 1903 г. в г. Москве. В 1924 г. начал трудиться в тресте «Днепрострой» в должности техника. В 1925–26 гг. служил в рядах Красной Армии. В 1932 г. поступил на заочное отделение Московского гидромелиоративного института, которое окончил в 1937 г., получив квалификацию «инженер-гидротехник».

В 1926–38 гг. работал в различных проектно-изыскательских организациях, специализирующихся на гидрологических и водохозяйственных работах. В 1938–60 гг. работал в «Гидроэнергопроекте» в должности старшего инженера, руководителя группы, начальника сектора, главного инженера. Под его руководством и при непосредственном участии разработано значительное число гидрологических и водохозяйственных проектов крупных гидроэлектростанций (ГЭС): Горьковской, Иркутской, Братской, Куйбышевской, Красноярской, Каунасской. Принимал участие в проектировании Днепрогэса – первой крупной ГЭС страны.

В 1941–45 гг. без отрыва от производства проводил допризывную подготовку на военно-учебном пункте Всеобуча при Коминтерновском РВК г. Москвы (в должностях от командира взвода до началь-



ника военно-учебного пункта). 1947–50 гг. депутат Бауманского районного Совета депутатов трудящихся г. Москвы.

В 1947 г. в Московском энергетическом институте защитил диссертацию «Потенциальные гидроэнергоресурсы Уральских рек» на соискание учёной степени кандидата технических наук. В 1949–56 гг. преподавал по совместительству в Московском инженерно-строительном институте им. Куйбышева в должности доцента по кафедре «Водное хозяйство и морские порты». В 1951 г. был утверждён в учёном звании доцента.

В 1951–54 гг. работал в Энергетической академии Министерства энергетики, созданной для повышения квалификации руководящих работников Министерства. В 1960 г. перешёл на работу в отдел электрификации народного хозяйства Госплана СССР, где проработал до 1969 г. в должности главного специалиста по водному хозяйству. Основные направления его деятельности в этот период были связаны с подготовкой решения о выделении водного хозяйства в самостоятельную отрасль народного хозяйства; организацией разработки Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов; разработкой предложений об установлении платы за использование водных ресурсов.

Ю.В. Александровский принимал активное участие в работе Совета Экономического Взаимодействия руководителей водохозяйственных органов (СЭВ) в качестве руководителя советской делегации.

В 1969–74 гг. работал в должности заместителя директора по научной работе Института водных проблем АН СССР и заведующего сектором научных основ Генеральной схемы комплексного использования водных ресурсов.

Общий объём печатных работ – порядка 40 п.л.; к наиболее известным публикациям относятся: Краткий справочник для гидрологических расчетов. М.: Энергоиздат, 1948; Нормы, технические условия и инструкции для проектирования гидротехнических сооружений гидроэлектростанций. Сборник №5. Расчет максимальных расходов воды. ТУ-24–29–41; Справочник по проектированию, строительству и эксплуатации городских сетей и гидротехнических сооружений. Том II раздел II – краткие сведения о гидрологии и водном хозяйстве. Издательство Министерства Коммунального хозяйства РСФСР Мос-

ква, 1961 г.; Гидрология и гидротехнические сооружения. М.: Государственное издательство «Высшая школа», 1961 г. Допущено Министерством высшего и среднего специального образования в качестве учебника для строительных вузов; О составлении Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов на отдаленную перспективу // Гидротехническое строительство, №8, 1971.

В 1963–73 гг. член редакционной коллегии журнала «Гидротехническое строительство»; член экспертной комиссии Высшей Аттестационной комиссии (ВАК) по специальности «Гидротехника и мелиорация». Принимал участие в государственных экспертизах большинства важнейших водохозяйственных объектов и крупных гидроэлектростанций, сооружаемых в нашей стране.

Имеет государственные награды: Орден «Трудового красного знамени» (1954 г.); Медали «За оборону Москвы» (1944 г.), «За победу над Германией» (1945 г.); «За доблестный труд в Отечественной войне» (1946 г.), «За трудовую доблесть» (1952 г.), «За трудовое отличие» (1971 г.), «Двадцать лет победы в Великой отечественной войне» (1965 г.) «Тридцать лет победы в Великой отечественной войне» (1975 г.), «В память 800-летия Москвы» (1947 г.). Награжден почетным знаком «40 лет Днепрогэс».

А.Ю. Александровский
(Национальный исследовательский университет «МЭИ»)
Л.Ф. Сотникова (ИВП РАН)
М.И. Степанова (ИВП РАН)

Баренбойм Григорий Матвеевич

(11.7.1933 – 04.5.2016)



Григорий Матвеевич Баренбойм – крупнейший учёный биофизик, всемирно известный специалист в области изучения биологически активных веществ, доктор физико-математических наук, профессор.

Г.М. Баренбойм родился 11 июля 1933 г. в Ленинграде. Окончил школу в 1951 г. с золотой медалью. Поступить на математико-механический факультет Ленинградского университета, как ему хотелось, не удалось (борьба с космополитизмом). Документы приняли только на факультет береговых построек Ленинградского высшего военно-морского учи-

лища инженеров оружия, что означало тогда 25 лет обязательной службы на флоте. Флотская дружба осталась на всю жизнь, Григорий Матвеевич ежегодно принимал участие в сборе выпускников 15 мая.

Как неуёмный человек он больше всего боялся потерять время и что-то в жизни не успеть, поэтому тайно поступил на вечернее искусствоведческое отделение живописи Ленинградского университета. Ему удалось проучиться только 3 года – учёба одновременно в 2-х высших учебных заведениях была раскрыта, и он был изгнан из Университета.

В училище Григорий Матвеевич перевёлся на новый факультет атомных подводных лодок, которые только начинали строить, и в 1957 г. с дипломом инженера-химика был распределён в распоряжение командующего Северным флотом. Так он оказался в Северодвинске на атомной подводной лодке в звании старшего инженера-

лейтенанта и принимал участие в учениях с применением атомных боеприпасов на Новой Земле, а также в походе через Северный полюс.

Через несколько лет Григорий Матвеевич был назначен начальником дозиметрической службы крейсера на Черноморском флоте в Севастополе. В качестве хобби стал писать пьесы для местного драмтеатра им. Луначарского. Успех был внушительный. Он стал «звездой» флота и приглашался в дом главнокомандующего, который, видя его талант, помог ему комиссоваться. В возрасте 26-и лет Григорий Матвеевич вернулся в Ленинград и начал научную карьеру в должности инженера в Институте цитологии АН СССР. Одновременно он подрабатывал в качестве сценариста на Студии научно-популярных фильмов (фильм о наскальных рисунках в Карелии получил премию на фестивале), сотрудничал с журналами и издательствами, писал статьи по различным темам: о жизни революционера-народника Николая Морозова, о провокаторе Азефе и т. д. Избирается членом Союза журналистов и Союза писателей; пишет книги для детей.

В 1963 г. защищает кандидатскую диссертацию. Его книга «Люминесценция биополимеров и клеток» (М.-Л.: Наука, 1966) переводится на английский язык издательством Plenum Press.

В 1970 г. из-за конфликта с первым секретарем Ленинградского обкома КПСС Г.В. Романовым был уволен из Института цитологии. Устроиться на работу в Ленинграде не удаётся, и в конце 1972 г. он принимает приглашение в Киевский институт теоретической физики АН УССР на должность и.о. заведующего отделом экспериментальной биофизики. Через год Институт, директором которого был сын попавшего в опалу первого секретаря ЦК КП Украины П.Е. Шелеста, закрывают, и в марте 1974 г. Григорий Матвеевич уехал в Москву.

В Москве Григорий Матвеевич был принят на должность заведующего лабораторией биофизических основ взаимодействия биологически активных веществ (БАВ) с хромосомными структурами Института по биологическим испытаниям химических соединений, возглавляемый академиком Л.А. Пирузяном. Задача института состояла в испытании тысяч старых и вновь появляющихся химических соединений на биологическую активность с целью применения их в

качестве лекарств. Григорий Матвеевич разработал проект Системы биологических испытаний химических соединений, в результате чего был создан комплекс для исследования воздействия БАВ на тест-объекты уровней клетки, ткани и органа методами люминесцентно-телевизионной микроскопии.

В 1974 г. он защищает диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук на тему «Люминесцентный и абсорбционный анализ нуклеопротеидов в ультрафиолетовой области спектров (методы, аналитические приложения, техника». В 1978 г. получает звание профессора. В течение 12-и лет был профессором кафедры медицинской биофизики Московского физико-технического университета.

В 1986 г. вышла книга – Баренбойм Г.М., Маленков А.Г. Биологически активные вещества: новые принципы поиска. – М.: Наука, 1986, – вызвавшая большой резонанс в биофизике. В частности, система испытаний больших массивов веществ, теоретические принципы которой описаны в книге, была реализована в США на современном техническом уровне.

Конец трудовой деятельности в Институте Пирузяна пришелся на 1984 г., когда в нём по ложному доносу появились сотрудники Прокуратуры РСФСР и КГБ. Институт был разогнан, и Григорий Матвеевич был вынужден снова искать работу.

В 1988 г. академик Е.П. Велихов организовал Отделение Всемирной лаборатории в СССР, в рамках которой в октябре 1988 г. на правах международного института была создана Экологическая станция контроля окружающей среды (ЭСКОС), возглавить которую он предложил Григорию Матвеевичу. Всё надо было начинать с нуля в новой области научного знания.

Всемирная лаборатория – ассоциация европейских учёных, отпочковавшаяся от известного «Римского клуба». Это было сделано для того, чтобы европейская наука могла конкурировать с наукой американской. Новая организация объединяла учёных разных стран, должна была искать для них финансирование и создавать крупные проекты. В задачи ЭСКОС входило проведение международных экспертиз в экологически неблагополучных районах СССР. Были проведены экспертизы Кузбасса, Усть-Каменогорска, где добывают около 40 наименований цветных металлов и где впервые была про-

ведена открытая экспертиза 3-х урановых заводов, на Байкальском ЦБК. Однако в 1992 г. Е.П. Велихов закрыл Отделение Всемирной Лаборатории в России. Экологическая станция продержалась еще два года как самостоятельная организация, но без постоянного финансирования прекратила существование.

В 1995 г. Г.М. Баренбойм стал директором Государственного центра водохозяйственного мониторинга Комитета по водным ресурсам РФ; руководил работами по мониторингу рек Колвы, Усы, Печоры в связи с крупнейшей в России аварией в Республике Коми, когда из-за порыва нефтепровода разлилось более 100 тыс. тонн нефтеводяной смеси; возглавлял работы по мониторингу рек Сунжи и Терек в связи с разливами нефти в период военного конфликта на территории Чеченской Республики. Как итог проделанной работы выходит его книга «Опыт ликвидации аварийных разливов нефти в Усинском районе Республики Коми», Сыктывкар, 2000 г.

С 2009 г. до своей кончины в мае 2016 г. Григорий Матвеевич работал главным научным сотрудником лаборатории охраны вод Института водных проблем РАН. Одно из направлений его научной деятельности за годы работы в ИВП РАН связано с разработкой научных и технологических основ создания систем экологического мониторинга качества природных поверхностных вод. Эта работа позволила обобщить накопленный многолетний опыт, выделить наиболее перспективные технологии, в перечень которых вошли автоматизированные системы мониторинга, технологии мониторинга водных объектов в условиях повышенного экологического риска, информационные технологии мониторинга водных объектов и др. Отдельно рассматривались проблемы нефтегенного загрязнения вод, научные основы мониторинга которого разработаны Г.М. Баренбоймом.

Другим научным направлением работы Г.М. Баренбойма стало исследование влияния ксенобиотиков на качество вод и формирование экологических рисков по отношению к человеку и гидробионтам. В частности, работа касалась такого нового, неизученного в России аспекта, как лекарственное загрязнение вод. Под руководством Г.М. Баренбойма были проведены рекогносцировочные исследования по обнаружению лекарственного загрязнения водных объектов – источников питьевого водоснабжения г. Москвы, а также

создан алгоритм поисковой и расчётной информационной системы оценки биологической опасности органических ксенобиотиков, включая лекарства.

В развитых странах мониторингом ксенобиотиков и исследованием их влияния на организм человека занимаются более 15 лет. В РФ работы Г.М. Баренбойма были пионерными. Он сумел привлечь к работе группу молодых сотрудников, двое из которых защитили кандидатские диссертации. Вышли в свет монографии: Баренбойм Г.М., Чиганова М.А. Загрязнение природных вод лекарствами / Отв. ред. Л.И. Эльпинер. – М.: Наука, 2015. – 312 с.; Научные основы создания систем мониторинга качества природных поверхностных вод / Под ред. Г.М. Баренбойма, Е.В. Веницианова, О.П. Авандеевой. М.: Изд-во «Научный мир», Научная деятельность Г.М. Баренбойма в области мониторинга водных объектов, комплексного использования и охраны водных ресурсов получила широкое признание в научных кругах.

Тяжелая болезнь и кончина прервали творчество Григория Матвеевича в самом его расцвете. Его наследие удивительно разнообразно. Это – молекулярная биофизика, биофизика клетки, фотобиология, медицинская биофизика, экологический мониторинг, биофизическая фармакология. Его вклад в исследование и решение проблем качества и охраны природных вод неоценим.

*Л.А. Протозанова,
Е.В. Веницианов (ИВП РАН),
О.П. Авандеева (ИВП РАН),
М.А. Чиганова (ИВП РАН)*

Ксенобиотики с лекарственной активностью – новая угроза для окружающей среды¹

Баренбойм Г.М., Чиганова М.А.

Введение

Сравнительный анализ тенденций увеличения водопотребления и загрязнения вод в ближайшее столетие, согласно одной из моделей развития, показывает, что уже в 2030 г. основу водопотребления будут составлять загрязненные воды. Более оптимистические модели загрязнения отодвигают этот срок на 20–30 лет (Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., 2006). Эти обобщенные данные не отражают распределение составляющих их компонентов по географическим зонам, по континентам и странам, некоторые из которых уже чувствуют, а некоторые вплотную видят маячащий перед ними водный голод. Загрязненностью, часто высокой во всем течении или частично, отличается большинство крупных рек России, включая Волгу.

В России по состоянию на 2010 г. 23,3% проб воды поверхностных водоисточников не соответствует гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям; 18,2% – по микробиологическим показателям. В целом санитарным правилам и нормативам не соответствует 36,8% поверхностных источников питьевого водоснабжения и 16,4% – подземных. Доля проб воды из источников централизованного водоснабжения, не соответствующих гигиеническим нормативам, по санитарно-химическим показателям составила 28,9%, по микробиологическим – 5,9% (Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 2010 году»).

Следует отметить тенденцию роста угроз загрязнения природных вод химическими соединениями (ХС). Конец XX–начало XXI века характеризуется интенсивным ростом массива различных ХС. По данным Chemical Abstracts Service (CAS), службы, осуществляющей международную регистрацию веществ, к 1 июня 2012 г. зарегистрировано более 66,7 млн ХС (в 1990 г. всего 10 млн ХС) (официальный сайт CAS – <http://www.cas.org>). В этом массиве доминируют орга-

¹ Баренбойм Г.М., Чиганова М.А. Ксенобиотики с лекарственной активностью – новая угроза для окружающей среды. Лекции для практикующих врачей / Науч. ред. Чучалин А.Г. – М.: ЗАО РИЦ «Человек и лекарство», 2013. С. 12–27

нические ХС – их количество, по некоторым данным, превышает 30 млн (Навигация в мире органических соединений, 2010, http://shmat-razum.blogspot.com/2010_07_01_archive.html). Рост массива практически неограничен. Кроме того, в базе данных CAS зарегистрировано более 63,6 млн последовательностей белков (Database Counter – <http://www.cas.org/cgi-bin/cas/regreport.pl>).

Все ХС потенциально обладают биологической активностью (БА), проявление которой зависит от биологической мишени, способа введения, дозы и некоторых других факторов (Баренбойм Г.М., Маленков А.Г., 1986). Органические ХС представляют подавляющую часть ксенобиотиков. Анализ перечня ХС, проявивших мутагенную активность хотя бы на одной из известных тест-систем, показывает, что именно среди органических ХС находится основная часть мутагенов (Дурнев А.Д. и др., 2010) и канцерогенов, учитывая хорошо известную связь между мутагенностью и канцерогенностью. Совокупность видов БА всех находящихся в воде примесных ХС составляет ксенобиотический профиль водного объекта; практически этот профиль определяется только для обнаруженных ХС, а в нашем случае – только для обнаруженных органических ХС.

В ксенобиотическом профиле водных объектов наибольший интерес в последнее десятилетие представляют ксенобиотики с фармакологической (лекарственной) активностью. К таким ксенобиотикам потенциально можно отнести: а) сами лекарства и их метаболиты, если те и другие попадают в воду как загрязнители, а также вторичные продукты их физико-химической деградации; б) ксенобиотики, не являющиеся лекарствами, но обладающие фармакологической активностью.

Если рассматривать возможное негативное действие веществ с фармакологической активностью (лекарств и «нелекарств»), то очевидно, что надо также учитывать состав всего загрязнения вод, принимая во внимание возможное синергидное действие сложных смесей.

Исходя из сказанного выше, сформулированы цели этой работы:

- рассмотреть данные о лекарственном загрязнении вод, имеющиеся в разных информационных источниках;
- разработать методику обнаружения лекарств в воде и провести рекогносцировочные исследования лекарственного загрязнения

Некоторые классы лекарственных средств, обнаруженных в водных объектах (Santos L. et al., 2010)

Фармакологическая группа	Лекарственные средства
Антибиотики	Ципрофлоксацин, эритромицин, пенициллин G, цефалексин, хлортетрациклин
Гормоны	17 β -эстрадиол, эстрон, эстриол, 17 β -этинилэстрадиол
Нестероидные противовоспалительные средства	Салициловая кислота, кетопрофен, диклофенак, индометацин, ибупрофен, парацетамол
Антидепрессанты	Сертралин, циталопрам, флуоксетин, флувоксамин, пароксетин, венлафаксин
Противоэпилептические средства	Карбамазепин, карбамазепин-10,11-эпоксид

на водных объектах, используемых как источники питьевого водоснабжения;

- разработать методику обнаружения и оценки лекарственной активности ксенобиотиков—«нелекарств» и провести рекогносцировочные исследования такого загрязнения на объектах, используемых для питьевого водоснабжения;
- дать рекомендации по снижению экологических рисков, генерируемых ксенобиотиками с лекарственной активностью (как лекарствами и их метаболитами, так и «нелекарствами»).

**Лекарственное загрязнение водных объектов
(аналитический обзор)**

В настоящее время все большую обеспокоенность вызывает загрязнение природных вод суши лекарственными препаратами, которые все чаще обнаруживаются в поверхностных водах и даже в питьевой воде. Большинство сообщений о загрязнениях лекарствами посвящено таким группам препаратов как антибиотики, половые гормоны, нестероидные противовоспалительные средства, а также противоэпилептические и антидепрессивные средства (табл. 1) (Santos L. et al., 2010).

Эти группы веществ, как и ряд других обнаруживаемых групп ХС, способны иногда даже при следовых концентрациях и длительных временных воздействиях оказывать негативное влияние на гидробиоту (Snyder S. et al. Pharmaceuticals in the Water Environment, 2009) и, в принципе, на человека. При этом в России прогнозирует-

ся дальнейший рост лекарственного загрязнения в связи созданием все более эффективных, сильнодействующих препаратов и утверждением «Стратегии развития фармацевтической промышленности в России на период до 2020 года» – «ФАРМА-2020» (Официальный сайт Стратегии – <http://www.pharma2020.ru/>).

Среди источников такого загрязнения можно выделить фармацевтические производства, соответствующие исследовательские центры, медицинские и аптечные учреждения, объекты сельского хозяйства (животноводства и птицеводства). Население также вносит свой вклад в лекарственное загрязнение за счет попадания в окружающую среду части лекарств и их метаболитов из организма человека, избавления от просроченной продукции и т. д.

Так, например, антибиотик линкомицин обнаружен в США в больничном и животноводческом стоках (2–6,6 мг/л). Антибиотики фторхинолоны найдены в США и Португалии в больничных стоках (2–11 мг/л), в США, Португалии и Швеции в стоках очистных сооружений (90–1000 нг/л) и сточных водах (<6–310 нг/л), а также в поверхностных водах рек Ламбро, Италия (14,36 нг/л) и Мондего, Португалия (79,6–119,2 нг/л). Энрофлоксацин, используемый в ветеринарии, обнаружен в стоке очистных сооружений (121,8–447,1 нг/л) и в сточных водах (53,7–270 нг/л) в Португалии и США, а также в Португалии в поверхностных водах реки Мондего (67,0–102,5 нг/л). Окситетрациклин – антибиотик, разрешенный для применения в ветеринарии, обнаружен в Италии в реках По и Ламбро (248,90 и 24,40 нг/л) соответственно (Santos L. et al., 2010).

Не рассматривая особенностей действия малых доз, сделаем два замечания, полезных для дальнейшего изложения. Многие исследования при оценке эффекта длительного воздействия лекарственного загрязнения вод на гидробиоту и человека указывают на развитие бактериальной устойчивости и дальнейшее потенциальное появление перекрестной резистентности к различным классам антибиотиков у человека (Супотницкий М.В., 2011). Кроме того, исходя из общих представлений, можно предположить, что, постоянно сосуществуя с патогенными микроорганизмами в водной среде, антибиотики делают их менее восприимчивыми к лекарствам, что создает угрозу снижения эффективности действия антибактериальных средств в случае генерации инфекционных заболеваний этими патогенами.

Половые гормоны, как известно, исходно проявляют свою БА даже при очень низких дозах. Результатами многочисленных исследований показано, что наиболее часто в водных объектах встречаются эстрогены. При этом отмечены нарушения репродуктивной функции, а также увеличение популяции самок по сравнению с самцами у рыб, обитающих в реках Великобритании, которые содержат подобные соединения (Santos L. et al., 2010). Показано также, что наличие прогестерона в воде приводит к увеличению доли самцов у рачков *Daphnia magna* S. (Ежова Е.Е., Чибисова Н.В., Полунина Ю.Ю., 2011).

Разработка методов обнаружения ксенобиотиков (включая лекарства) в водных объектах и методов определения фармакологической активности у «нелекарственных» веществ

Первый этап работ по идентификации органических ХС и определения их БА начинается с выбора анализируемого водного объекта, определения целей и задач его изучения, сбора имеющейся информации о нем, включая сведения о загрязнениях и их возможных источниках. Существенным фактором, влияющим на достижение конечной цели исследований, является определение типа поиска и конкретного перечня искомых органических ХС или их химических классов, что может сильно повлиять на выбор методов подготовки и анализа проб (Баренбойм Г.М. и др., 2011). В решении аналогичных задач, представленных в литературе (см., например, Fatta D. et al., 2007), доминируют технологии пробоподготовки и последующего анализа, привязанные к определенным веществам или к их определенным химическим классам. Нами составлена библиотека из описаний около 200 таких технологий для различных органических ХС.

При определении большого числа веществ, в том числе, априорно неизвестных, приходится прибегать к скрининговым методикам подготовки и анализа, что соответственно уменьшает специфичность анализа проб и тем самым, как правило, снижает порог чувствительности метода. В рамках данной работы с нашим участием создана скрининговая методика определения ксенобиотиков в пробах воды и донных отложений, условно названная универсальной и подразумевающая две ветви пробоподготовки, которые, в принципе, разделяют неполярные и полярные соединения. Наиболее часто при анализе органических ХС используются хроматография, хро-

матомасс-спектрометрия и/или методы оптической спектроскопии (Другов Ю.С. и др., 2010). Конечным итогом этой процедуры (первого этапа исследования) является определение концентрации органических ХС и их химической структуры.

Второй этап – установление по химической структуре принадлежности обнаруженных органических ХС к лекарствам или их метаболитам, а также прогноз фармакологической и токсической активностей других обнаруженных органических ХС. Согласно разработанной авторами технологии, определение БА качественно осуществляется в рамках специальной поисковой и расчетной информационной системы (ПРИС). Функционирование ПРИС частично автоматизировано.

Основу первой части ПРИС составляют: а) нормативные документы России и других стран, содержащие значения предельно или ориентировочно допустимых концентраций для различных веществ; б) списки особо опасных веществ; в) сериальные справочники по отдельным токсическим веществам; г) регистры или базы данных, формируемые международными и национальными организациями; д) базы данных по лекарствам и их метаболитам. Вторая часть ПРИС представлена расчетной технологией определения БА путем анализа взаимосвязей «структура–активность» (оценка на основе обучающей выборки, физико-химических свойств, квантово-химические расчеты и др.). В данной ПРИС использован метод оценки на основе обучающей выборки. Такой метод, разработанный в Институте биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича РАМН реализован, в частности, в компьютерной программе PASS, и преимущественно ориентирован на конструирование новых лекарств (Филимонов Д.А., Поройков В.В., 2006).

Современная версия компьютерной программы PASS 11.1 прогнозирует более 4000 видов БА со средней точностью свыше 95% (скользящий контроль с исключением по одному). Обучающая выборка программы PASS 11.1 содержит информацию о более чем 250 000 лекарственных препаратов и биологически активных соединениях, включая данные о многих химических токсикантах.

Программа позволяет классифицировать БА по классам: а) токсичность; б) макроэффекты (фармакологические эффекты); в) биохимические механизмы действия; г) химические превращения в

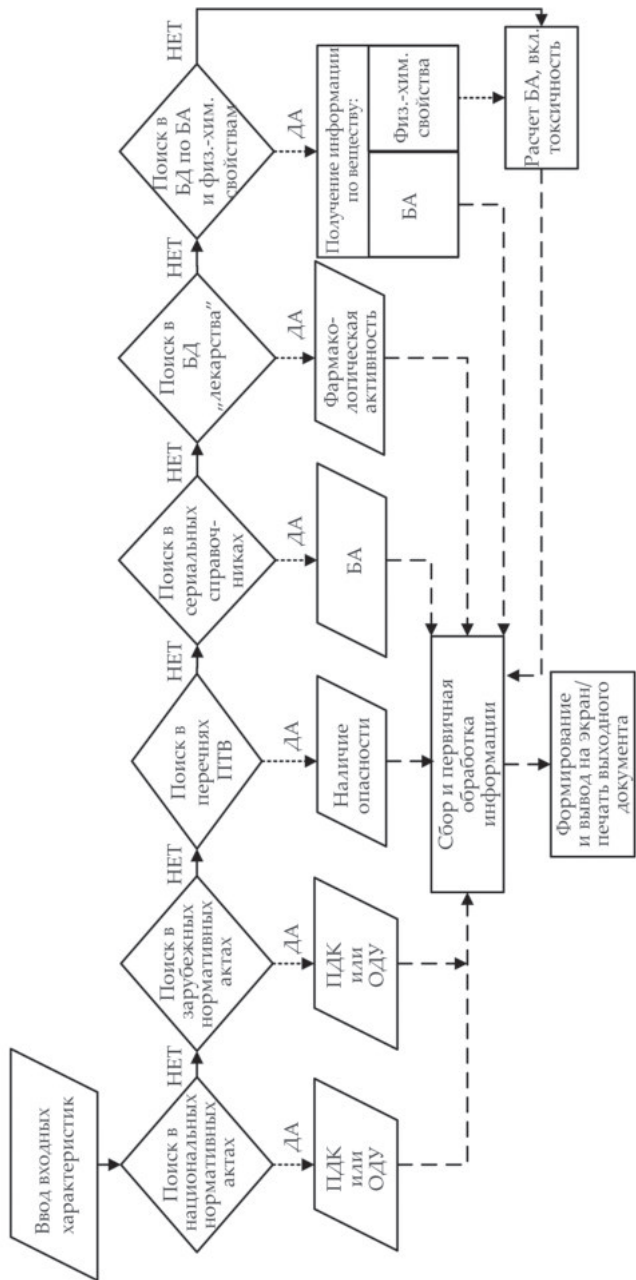


Рис. 1. Алгоритм работы ПРИС по оценке БА.

ОДУ – ориентировочно допустимый уровень, ПДК – предельно допустимая концентрация, ПТВ – приоритетно токсичные вещества, БА – базы данных.

Примечание: под БА «лекарства» понимаются синонимическая БА (содержит химическую структуру, химическое название, синонимы и некоторые свойства, вкл. токсичность) и БА метаболитов

терминах метаболизма; д) эффекты влияния на генную экспрессию; е) эффекты влияния на белки-транспортеры (Филимонов Д.А., Поройков В.В., 2006).

БА описывается в PASS качественно («активное» или «неактивное») в виде спектра БА органического соединения – множества различных видов БА, описывающих результат взаимодействия вещества с различными биологическими объектами. Спектр БА отражает «внутренние», присущие данному соединению свойства, зависящие только от его химического строения. В PASS принимается, что анализируемое вещество не обладает теми видами БА, которые не указаны в его спектре, хотя и нельзя исключить ситуации, когда информация о какой-либо БА вещества из обучающей выборки либо не была найдена в доступных источниках, либо оно обладает некоторой БА, но на эту БА вещество из обучающей выборки еще не испытывалось (Филимонов Д.А., Поройков В.В., 2006).

Функциональный алгоритм работы ПРИС представлен на рис. 1.

Рекогносцировочные исследования ксенобиотического загрязнения водных объектов-источников водоснабжения Москвы

Реальный поиск органических ХС проводился на водозаборах четырех станций водоподготовки (Северной, Западной, Восточной, Рублевской), а также на водных объектах системы питьевого водоснабжения на Ивановском, Истринском, Можайском и Учинском водохранилищах, на реках Москва, Истра и Руза. На первом этапе работ проведены каталогизация источников ксенобиотического загрязнения названных водных объектов, а также их картирование. На втором этапе по результатам аналитических исследований в воде, донных отложениях и снежном покрове акватории обнаружены 136 органических ксенобиотиков, однако только у 17 имелись данные по ПДК. Предварительный анализ результатов применительно ко всему загрязнению этих вод представлен в публикации (Данилов-Данильян В.И. и др., 2012).

ПРИС использовали для прогноза БА всего пула обнаруженных органических ХС, в том числе для выделения из всего этого пула групп веществ с реальной или потенциальной фармакологической активностью. Так, выявлено 23 лекарственных препарата (действующих веществ), 9 вспомогательных веществ, 10 веществ, проявляющих

Таблица 2

Некоторые обнаруженные лекарства (рекогносцировочные исследования)

Название	Фармакологическое действие	Концентрация, мг/л	Место обнаружения
N-бутилбензол-сульфамид	Противогрибковое, противоопухолевое (лечение рака предстательной железы)	0,026	р. Москва
Кофеин	Психостимулирующее Аналептическое	0,026 0,027*	р. Москва, Иваньковское в/х
13-докоценамид	Ранозаживляющее	0,006 0,024 0,012	р. Москва Истринское в/х Иваньковское в/х
12-метилтетрадекановая кислота	Противоопухолевое	0,038	Иваньковское в/х
Эритритол	Нейропротекторное (лечение острых неврологических расстройств)	0,0022 0,002	Истринское в/х Иваньковское в/х
Бета-ситостерол	Противовоспалительное (лечение заболеваний предстательной железы), противовирусное	0,005 0,234*	Учинское в/х Иваньковское в/х

* Пробы донных отложений (концентрация ХС в мкг/г); здесь и в табл. 3: в/х – водохранилище.

фармакологическую активность, но, по ряду причин, не используемых в медицине, и 5 витаминных комплексов и БАДов.

Расчетные технологии выявили антимикробную активность у некоторых веществ (9-октадеценамида, 2-фенилацетамида, аценафтилена, октатиокана), которые, в принципе, могут повышать устойчивость к ним патогенных микроорганизмов в воде и в организме человека. В табл. 2 приведены некоторые обнаруженные лекарства и указано их фармакологическое действие.

С помощью ПРИС, в частности, было показано, что ряд обнаруженных органических ХС представляют собой метаболиты исходных субстанций известных лекарственных средств (табл. 3). Среди них два вещества обладали антигельминтной, одно – противогрибковой, пять – противоопухолевой активностью. Таким образом, эти вещества относились к классам препаратов, наличие которых в

**Некоторые обнаруженные метаболиты известных лекарственных средств
(рекогносцировочные исследования)**

Метаболит и его лекарственная активность	Субстрат	Фармакологическое действие субстрата	Место обнаружения метаболита
Гексадекановая кислота (противоопухолевое, агонист апоптоза)	Эйкозапентаеновая кислота	Противоастматическое, противодиабетическое, антигипертензивное, антитромботическое	р. Москва
Октадеканол (противогрибковое)	Эдельфозин	Противоопухолевое	р. Москва
Мочевина (антисептик, дерматологическое, мочегонное)	Амобарбитал	Противоэпилептическое, снотворное	Иваньковское в/х
Сквален/сквалан (антиканцерогенное, антимикробное, фунгицидное)	Линолевая кислота	Дерматологическое	Истринское в/х Иваньковское в/х

питьевой воде даже в низких концентрациях может вызывать резистентность к ним у гельминтов и грибов, либо повысить устойчивость к препаратам, имеющим в силу своего функционального назначения достаточно высокую токсичность (противоопухолевые препараты).

Кроме того, выявлено 59 органических ХС, у которых расчетно прогнозировалась фармакологическая активность (табл. 4). Проявление такой активности, названной нами квазифармакологической, у органических ХС, обнаруженных в водной среде, может негативно сказаться на гидробиоте и человеку. Кроме того, через квазифармакологическую активность можно определить мишень действия органических ХС (системы, органы, ткани, клетки, биохимические и молекулярно-биологические процессы), если механизм такой фармакологической активности известен.

Расчетное определение БА всего пула обнаруженных в воде ксенобиотиков показало, что лекарственное загрязнение будет влиять на живые организмы во взаимодействии с другими опасными ксенобиотиками, тем самым способствуя усилению негативных эффектов.

Пример расчета квазифармакологических активностей обнаруженных органических соединений (с указанием вероятности проявления)

2-метилбензиловая кислота	9-гексадецен-1-ол	Фенилуксусная кислота
вид активности/вероятность проявления		
<ul style="list-style-type: none"> • Противоэксземная/0,856 • Противосеборейная/0,842 • Лечение фобических расстройств/0,845 • Стимулятор функции почек/0,825 • Фибринолитическая/0,824 • Противовоспалительная (лечение заболеваний поджелудочной железы)/0,826 • Иммуностимулятор/0,828 • Спермицид/0,779 • Антацидная/0,758 • Лечение болезни Бехтерева/0,760 • Противовирусная (арбовирус)/0,743 • Стимулятор слюноотделения/0,747 • Противовоспалительная (для лечения заболеваний кишечника)/0,720 	<ul style="list-style-type: none"> • Противоэксземная/0,914 • Лечение фобических расстройств/0,889 • Сердечно-сосудистый аналептик/0,869 • Спермицид/0,860 • Антацидная/0,839 • Противовоспалительная (лечение заболеваний поджелудочной железы)/0,839 • Противовирусная (арбовирус)/0,837 • Стимулятор лейкопоза/0,816 • Противосеборейная/0,819 • Антимутагенная/0,790 • Иммуномодулятор/0,811 • Регулятор липидного обмена/0,790 • Антитромботическая/0,774 	<ul style="list-style-type: none"> • Лечение фобических расстройств/0,911 • Лечение болезни Бехтерева/0,881 • Противосеборейная/0,859 • Лечение пролиферативных заболеваний/0,838 • Иммуностимулятор/0,824 • Противоэксземная/0,810 • Противовоспалительная (лечение заболеваний поджелудочной железы)/0,794 • Лечение алопеции/0,782 • Стимулятор слюноотделения/0,776 • Лечение предракочных состояний/0,747 • Стимулятор функции почек/0,751

Некоторые опасные органические ХС, выделенные из всего массива обнаруженных в исследованных водных объектах в зависимости от вида их токсичности представлены в табл. 5.

Результаты расчетов также трансформированы в ксенобиотические профили исследованных водных объектов, причем эти профили географически привязаны к зонам отбора соответствующих проб (рис. 2).

В рамках работы также просчитаны LD50 некоторых обнаруженных нами органических ХС. Расчет проводился в Институте биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича РАМН с помощью компьютерной программы Gusar (Lagunin A. et al., 2011). Определены

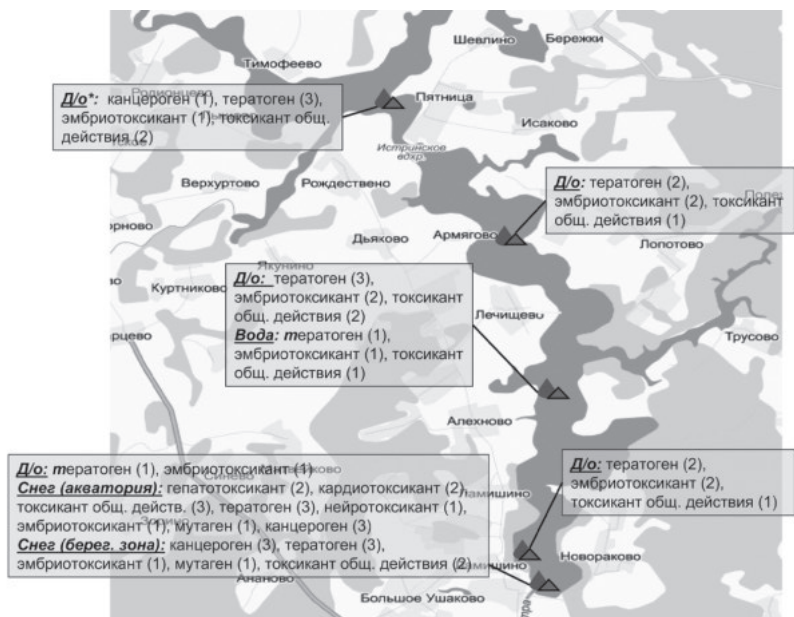


Рис. 2. Фрагмент экотоксикологической карты (на примере Истринского водохранилища): Д/о – донные отложения. В скобках указано количество обнаруженных в данном месте соединений с указанным видом активности.

Таблица 5

Некоторые опасные свойства обнаруженных органических соединений

Канцерогены	Мутагены	Тератогены
Аценафтилен	Диэтиленгликоль	Генэйкозан
Бензантрацен	Фенантрен	Дибутилфталат
Бензо(а)пирен	Флуорантен	Фенилуксусная кислота
Бис-(2-этилгексил)-фталат	4-Хлоранилин	Холестанол
Гидрохинон	1,1,2,3-Тетрахлор-1-пропен	2-Этилгексилфталат
Эмбриотоксиканты	Нейротоксиканты	Нефротоксиканты
Бензо(а)пирен	Тимин	Кофеин
D-Галактопираноза	1,1,2,2-Тетрахлорэтан	Ксилитол
Диметилфталат	4-Хлоранилин	Ребетол
Октадеканол	9-Гексадецен-1-ол	Стигмастерол
Циклотетрадекан	Метилвый эфир 3-гидроксимасляной кислоты	Кампестерол

**Результаты расчета LD50 обнаруженных органических соединений
по программе Gusar**

Название соединения	LD50, г/кг							
	путь введения:							
	внутрибрюшинно		внутривенно		перорально		подкожно	
	мыши	крысы	мыши	крысы	мыши	крысы	мыши	крысы
Холестерин	0,462	1,055	0,097	0,011	–	1,397	0,094	0,866
2-Этилгексилфталат	1,339	1,523	0,189	0,091	–	15,195	1,709	3,264
4-Хлоранилин	0,217	0,341	0,072	0,052	–	0,628	0,205	0,305
Ксилитол	–	0,643	0,501	5,588	9,425	7,894	9,195	9,189
Фенантрин	0,328	0,765	0,079	0,069	1,199	1,358	0,42	0,203

концентрации для мышей и крыс в зависимости от пути введения соединения в организм. Результаты представлены в табл. 6.

Разработка рекомендаций по снижению экологических рисков загрязнения вод лекарствами и другими ксенобиотиками с фармакологической активностью

Наличие лекарственного загрязнения вод и возникающих из-за этого экологических рисков для гидробиоты и человека, а также обнаружение реального воздействия такого загрязнения на живые организмы вызвало в различных странах появление специальных законодательных актов и нормативных документов. В России аналогичная законодательная и нормативная инициатива пока отсутствует. Сказанное подтверждается табл. 7, где приведен сравнительный анализ некоторых законодательных и подзаконных актов в США, ЕС и России, а также табл. 8, где дано значение величины, аналогичной ПДК, принятой в США для некоторых лекарств (фрагмент перечня); в России такое специальное нормирование отсутствует.

Таким образом, принятие специальных мер законодательного и нормотворческого характера по уменьшению лекарственного загрязнения, а также улучшение существующего законодательства и подзаконных актов, связанных с регламентом обращения с отходами, лекарствами и т. д., может заметно снизить экологические риски ксенобиотического загрязнения ХС, обладающими лекарственной активностью.

Сравнение законодательных документов о возможном лекарственном загрязнении, имеющихя в России и в зарубежных странах

Зарубежные страны	Россия
Указания о размещении неиспользованной фармацевтической продукции, ее утилизации (закон «Water Quality Investment Act», 2009, США)	Аналоги отсутствуют
Перечень US EPA из 104 органических ксенобиотиков, в т. ч. фармсоединения (эстрадиол, эритромицин, нитроглицерин и др.) для включения в закон о безопасной питьевой воде	Аналоги отсутствуют
Документ US EPA «Контроль за отходами медицины и медицинской промышленности» (особое внимание к лекарственной составляющей отходов)	СанПиН 2.1.7.728–99 «Правила сбора, хранения и удаления отходов лечебно-профилактических учреждений» (недостаточное внимание уделено лекарственной составляющей медицинских отходов)
Европейская стратегия по лекарствам в окружающей среде (Pharmaceuticals in the Environment. Results of European Environment Agency Workshop)	Аналоги отсутствуют
Директива ЕС 2001/83/ ЕС по организации централизованных систем сбора использованных и просроченных медикаментов	Аналоги отсутствуют

Следует также вести разработку ПДК хотя бы для наиболее опасных лекарств (активного начала, добавочных компонентов, метаболитов) в природных и питьевых водах. Еще одним направлением в этой области может явиться конструирование лекарственных препаратов, деградирующих в водной среде до безопасных фрагментов в сроки, заметно превышающие период их выведения из организма и длительность хранения в растворимой водной форме.

Следует также отметить, что по результатам названных выше исследований рекомендованы и уже начали внедряться меры по снижению экологических рисков, индуцированных ксенобиотическим загрязнением. Среди них:

- каталогизация и картирование основных источников антропогенной ксенобиотической (включая лекарственную) нагрузки для проведения превентивных мер;

Значение максимально допустимого остаточного уровня (MRL, нг/л) для некоторых лекарств (фрагмент полного перечня) (Snyder S. et al., 2009)

Название	MRL	Название	MRL
Мепробамат	0,25	Аторвастатин	0,25
Фенитоин	1	Диклофенак	0,25
Атенолол	0,25	Эстрон	0,2
Карбамазепин	0,5	Напроксен	0,5
Гемфиброзил	0,25	Норфлуоксетин	0,5
Сульфаметоксазол	0,25	о-р-гидроксиаторвастатин	0,5
Флуоксетин	0,5	Рисперидон	2,5
Диазепам	0,25	Тестостерон	0,5
Прогестерон	0,5	Триметоприм	0,25
Этинилэстрадиол	1	Эстрадиол	0,5

- совершенствование и развитие систем мониторинга водных объектов –источников водоснабжения применительно к оценке содержания и биологической опасности ксенобиотиков, включая лекарства;
- совершенствование технологий водоподготовки применительно к лекарственному загрязнению питьевых вод.

Заключение

В современном мире интенсивное производство и применение лекарств приводит к их постоянному и несанкционированному попаданию в окружающую среду и в первую очередь в водные объекты. Фармацевтические предприятия, больницы, аптеки, животноводческие и птицеводческие хозяйства, где также используются лекарства, и, наконец, сам человек – потребитель лекарств служат источниками такого загрязнения.

Исследования, проведенные в разных странах, показали реальное присутствие самых разнообразных классов лекарств в природных поверхностных, а также сточных водах. Установлено, что эти лекарства воздействуют на гидробиоту, предполагается их воздействие на человека через питьевую воду и пищевые продукты водного хозяйства.

В связи с ситуацией, описанной выше, разработана технология обнаружения лекарственного загрязнения вод, а также технология выявления ксенобиотиков, обладающих фармакологической активностью, но не являющихся лекарствами.

Конкретные исследования рекогносцировочного характера, проведенные нами на водохранилищах и реках, входящих в систему водоснабжения Москвы, выявили их лекарственное загрязнение, а также наличие в ксенобиотическом профиле исследованных водных объектов фармакологической активности, принадлежащей ксенобиотикам, не входящим в перечень известных лекарств. Показано, что негативное действие этих двух типов веществ будет развиваться на фоне проявления других опасных видов БА (мутагенности, канцерогенности и др.).

По итогам обзорных, методических и экспериментальных аспектов работы предложены рекомендации, направленные на снижение экологических рисков, связанных с фармакологической активностью ксенобиотического загрязнения.

Авторы благодарят заведующего лабораторией Института биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича РАМН д-ра биол. наук, проф. В.В. Поройкова за общее содействие в работе и непосредственное участие в реализации ряда расчетных технологий.

Блохинов Евгений Георгиевич

(27.9.1931 – 10.9.1971)

Евгений Георгиевич Блохинов – известный учёный-гидролог, крупный специалист в области инженерно-гидрологических и гидротехнических расчётов, кандидат технических наук.

Евгений Георгиевич родился 27 сентября 1931 г. в г. Новокаширск Московской области. В 1954 г. окончил с отличием гидротехнический факультет Московского института торфа, в 1959 г. – аспирантуру при Энергетическом институте АН СССР по специальности «инженерная гидрология». Для получения дополнительных математических знаний занимался на математическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова (1959–61 гг.).

В 1961 г. в Центральном институте прогнозов успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование повторяемости дождевых паводков в связи с расчётом отверстий гидротехнических сооружений» и получил учёную степень кандидата технических наук.

Е.Г. Блохинов в 1954–67 гг. работал в институте Гидропроект им. С.Я. Жука, в последние годы – в должности заместителя начальника отдела гидрологии. В этот период Е.Г. Блохинов был руководителем и ответственным исполнителем более чем 20-ти проектов крупных гидротехнических сооружений в нашей стране и за рубежом (в том числе, проект высотной Асуанской плотины на р. Нил в Египте) и главным инженером комплексных работ (в частности проекта вододелиителя в дельте р. Волги, схем водообеспечения народного хозяйства СССР и зарубежных стран и др.). Активно участвовал в экспертизах различных водохозяйственных проектов, рассматриваемых Государственной экспертной комиссией (ГЭК) при Госплане СССР.

Проектную работу Е.Г. Блохинов сочетал с научными исследованиями, за этот период им опубликована 21 научная работа по усовершенствованию и разработке новых методов инженерно-гидрологических расчётов.

С 1965 г. Е.Г. Блохинов перешёл на научную работу, возглавив Московскую лабораторию водохозяйственных проблем Государственного гидрологического института. В конце 1967 г. на базе этой

лаборатории и Совета по проблемам водного хозяйства Академии наук СССР был создан Институт водных проблем АН СССР, в котором Е.Г. Блохинов проработал фактически с момента основания до сентября 1971 г.

Весной 1971 г. в Государственном гидрологическом институте (г. Ленинград) успешно прошла предварительная защита докторской диссертации Е.Г. Блохинова. К сожалению, в сентябре 1971 г. жизнь этого талантливого учёного трагически оборвалась.

В 1974 г. диссертация Евгения Георгиевича была подготовлена к печати его коллегами – сотрудниками ИВП АН СССР Л.Ф. Сотниковой, И.О. Сармановым, З.Ф. Волковой, Т.Ф. Макаровой, О.А. Можяевой, Л.И. Никитиной – и опубликована полностью в виде монографии: Блохинов Е.Г. «Распределение вероятностей величин речного стока» / АН СССР, Институт водных проблем. – Москва: Наука, 1974. Практически все методические расчетные приемы этой монографии впоследствии вошли в Нормативные документы по определению расчетных гидрологических характеристик (СНИПы) разных лет издания. Монография стала настольной книгой для инженеров-гидрологов, студентов профильных вузов и научных сотрудников. Труды этого талантливого ученого составляют и сегодня фундамент инженерно-гидрологической науки и практических расчетов.

Л.Ф. Сотникова (ИВП РАН)

Усеченные распределения вероятностей для расчета максимального стока рек¹

Е.Г. Блохинов

1. Общие сведения и постановка задачи

Сущность усечения кривой распределения состоит в том, что из численного анализа исключается определенный интервал колебания признака и требуется по данным наблюдений в оставшемся интервале построить часть полного распределения, т. е. усеченное распределение. Применительно к расчету максимального стока используется лишь верхняя часть ряда наблюдений, расположенного в убывающем порядке, и исключаются из рассмотрения численные значения нижней части ряда.

Целесообразность такого подхода вызвана неравномерностью информации, предоставляемой данными о наиболее высоких за период наблюдений паводках или половодьях, с одной стороны, и данными о низких этих явлениях – с другой. Это является в первую очередь результатом неоднородности выборки, возникающей за счет существенно различных факторов, определяющих формирование высокого и низкого максимального стока.

Используя для построения теоретической кривой распределения значения параметров, вычисленные по всему ряду, мы тем самым требуем, чтобы она наилучшим образом описывала колебания признака в среднем во всем интервале вероятностей превышения. А это в ряде случаев ведет к тому, что, принимая в расчет в равной степени характеристики низких паводков или половодий, мы ухудшаем соответствие теоретической кривой эмпирическим данным в зоне малой вероятности превышения. Ясно, что такое положение не может быть признано методически правильным. Одним из средств, позволяющих исключить указанные искажения, является использование для расчета величин максимального стока усеченных кривых распределения вероятностей.

Теория усеченных распределений в теории вероятностей и математической статистике в настоящее время разработана слабо; выполненные в этом направлении исследования в большей своей

¹ Из книги Блохинов Е.Г. «Распределение вероятностей величин речного стока» / АН СССР, Институт водных проблем. – Москва: Наука, 1974. (глава шестая, стр. 115–134)

части относятся к нормальному распределению. Из систематических курсов математической статистики, изданных в СССР, специально этот вопрос рассмотрен лишь в работах А. Хальда [108, 128].

Возможность и целесообразность использования усеченных распределений для расчета максимального стока дождевых паводков исследованы на достаточно большом фактическом материале в нашей работе [8]; в отчетливом виде предложения о таком подходе к анализу и расчету рассматриваемых гидрологических явлений содержатся также в работах [79, 138]². В целом же вопрос о применении усеченных распределений вероятностей для описания повторяемости величин максимального стока в методическом отношении исследован и разработан мало.

Отметим прежде всего, что в математической статистике различают две разновидности усеченных распределений: собственно усеченное распределение (*truncated distribution*) и не полностью определенное распределение (*censored distribution*) (см. [108]). Различия между ними лучше пояснить на конкретных примерах из других областей [56, 108, 116].

Предположим, что генеральная совокупность состоит из некоторых промышленных изделий. Перед продажей продукция проверяется, и все изделия, у которых определяющая их характеристика x меньше некоторой величины ξ бракуются. Когда потребитель берет случайную выборку из продукции, он может взять ее только из неполной совокупности, состоящей лишь из элементов с $x > \xi$.

Другой аналогичный пример. Предположим, что мы располагаем данными о росте мужчин, признанных годными к военной службе (лица, рост которых меньше некоторой величины ξ в армию не берутся). Требуется по этим данным построить распределение роста мужчин данной страны (при условии, что мы не знаем, какое количество призывников было признано негодными к военной службе).

Для обоих приведенных примеров характерно то, что мы знаем лишь точку усечения ξ и не имеем никаких сведений о степени усечения, т.е. не знаем число элементов в выборке с $x < \xi$. Это примеры выборок из собственно усеченного распределения.

² Укажем также дополнительно интересные работы Д.Д. Квасова, Э.Э. Зубер-Яникун (труды ГТИ, вып. 61, 1957 г.) и Д.Д. Квасова, И.Я. Левина (труды ГТИ, вып.73, 1960 г.)

Другое положение возникает, когда мы можем производить выбор из полной генеральной совокупности, но отдельные значения наблюдений, меньшие (или большие) данного значения $x - x < \xi$ или ($x > \xi$), численно не определены. Предположим, например, что мы испытываем продолжительность работы ламп накаливания. Для того чтобы оценить это распределение, мы ставим эксперимент, включив в электросеть, скажем, 100 ламп. После определенного промежутка времени, например, 1000 часов, мы заканчиваем эксперимент, выключая лампы. Теперь наши лампы можно подразделить на две группы: 1) лампы, продолжительность работы каждой из которых (меньшая 1000 часов) нам известна; 2) лампы, продолжительность работы каждой из которых нам неизвестна, но известно, что она превышает 1000 часов. Это есть выборка из не полностью определенного распределения. В отличие от приведенных выше примеров в данном случае нам известна не только точка усечения, но и степень усечения, т. е. мы знаем число элементов выборки с $x > \xi$. Отметим, что эта дополнительная информация существенно повышает точность оценки искомых параметров полного распределения (или его некоторой части) по сравнению с первым случаем, т. е. при выборках из собственно усеченного распределения.

Очевидно, что при применении усеченных распределений для расчета максимального стока рек мы имеем дело с не полностью определенными распределениями. Об этом мы всегда будем помнить, хотя для краткости (как это допускается и в специальной литературе) обычно будем употреблять термин просто «усеченное распределение».

При использовании усеченных распределений, конечно, весьма сложным является вопрос об установлении границы между высокими и низкими паводками или половодьями и, по-видимому, не имеет определенного решения, так как в каждом конкретном случае эта граница может быть различной. В нашей работе [8] в качестве такой границы условно была принята медиана, т. е. предлагается оценку параметров распределение производить по верхней половине ряда наблюдений, расположенного убывающем порядке. Эту условную границу мы примем и при всех выводах и построениях в настоящей работе; думается, что для первого этапа применения усеченных распределений при расчетах максимального стока такое условие допус-

тимо. В дальнейшем, конечно, в этом отношении желательна постановка специальных исследований (как чисто теоретико-статистического плана, так и исследований, связанных с анализом особенностей формирования стока для рассматриваемых водосборов).

Еще раз, более отчетливо, сформулируем условия задачи. Итак, пусть мы имеем выборку x_1, x_2, \dots, x_n объемом n из некоторой совокупности с известным распределением $P(x)$. Расположим эту выборку в ранжированном порядке и разделим ее на две части: $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(m)} > \xi$ и $x'_{(m+1)}, x'_{(m+2)}, \dots, x'_{(n)} \leq \xi$, где ξ – известная точка усечений. Причем численные значения $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(m)}$ известны, а значения $x'_{(m+1)}, x'_{(m+2)}, \dots, x'_{(n)}$ не определены. Как только что оговаривалось, в настоящей работе мы принимаем $\xi = x_{me}$ (медиана) и соответственно $m = n/2$. По данным $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n/2)}$ требуется оценить параметры распределения и построить его верхнюю часть в интервале вероятностей превышения $P = 0 \div 50\%$.

Пусть $P(x)$ и $p(x)$ – соответственно функция распределения и плотность вероятностей исходной полной совокупности. Тогда функция распределения и плотность вероятностей односторонне усеченной совокупности будет определяться соотношениями [108]

$$P_{\xi}(x) = [P(x) - P(\xi)] / [1 - P(\xi)] \quad \text{при } x > \xi \quad (6.1)$$

$$p_{\xi}(x) = p(x) / [1 - P(\xi)] \quad \text{при } x > \xi \quad (6.2)$$

Очевидно, что для рассматриваемого случая $\xi = x_{me}$ выражение (6.2) запишется так:

$$p_{\xi}(x) = p_{x_{me}}(x) = 2p(x) \quad (6.3)$$

В заключение заметим, что термин «усеченное распределение» в настоящей работе мы будем употреблять для обозначения двух связанных между собой, но в то же время различных распределений.

В строгом смысле этот термин будет применяться для функции $P_{\xi}(x)$, выражаемой соотношением (6.1) и построенной как новое самостоятельное распределение в интервале вероятности превышения $P = 0 \div 50\%$ полного, рассматриваемого в качестве исходного распределения $P(x)$. Соответственно плотность вероятностей $p_{\xi}(x)$ для усеченного распределения выражается соотношением (6.2).

Однако применительно к задаче расчета максимального стока не эта функция является конечной целью построения. Для практических расчетов нас интересует верхняя часть полного распределения, параметры которого вычисляются через параметры усеченного распреде-

ления, оцениваемые по верхней половине ранжированной в убывающем порядке выборке. Эту часть полной кривой мы также будем называть усеченным распределением, подчеркивая тем самым отмеченные только что обстоятельства (отбрасывание практически не принимаемого в расчет интервала распределения и использование тем самым лишь части данных наблюдений при оценке его параметров).

2. Усеченное нормальное распределение

Задача оценки параметров усеченного нормального распределения рассмотрена достаточно полно [108, 112, 123, 127]. В указанных работах рассматривается общий случай задачи – для произвольной точки усечения ξ . Ниже дается вывод расчетных соотношений для оценки параметров усеченного нормального распределения применительно к частному случаю $\xi=x_{me}$. На этом простейшем распределении показан порядок математических рассуждений и выводов, которые мы будем использовать ниже и которые несколько отличны от выводов, приведенных в работах [108, 112, 123, 127]. К тому же работа А. Хальда [127], в которой дается вывод соотношений для нахождения оценок параметров не полностью определенного нормального распределения, малодоступна.

Оценка параметров x_0 и σ методом моментов. Итак, пусть мы имеем совокупность с плотностью

$$p(x; x_0, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(x-x_0)^2/2\sigma^2\right], \quad \infty > x > -\infty, \quad (6.4)$$

где x_0 – среднее распределения; σ – стандартное отклонение.

Как мы условились, точка усечения – медиана $\xi=x_{me}=x_{50}$ (для нее мы будем употреблять два указанных обозначения). В соответствии с соотношением (6.3) плотность усеченного нормального распределения выразится так:

$$p_{x_{me}}(x; x_0, \sigma) = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(x-x_0)^2/2\sigma^2\right], \quad x > x_{me}. \quad (6.5)$$

Требуется найти соотношения между параметрами исходного полного распределения (6.4) x_0 и σ и соответствующими параметрами усеченного распределения $x_{0_{50}}$ и σ_{50} (построенного в интервале $x > x_{me}$ (6.5), от которых можно перейти к соотношениям между моментными оценками этих параметров. Параметры $x_{0_{50}}$ и σ_{50} и в соответствии с (6.5) определяются выражениями:

$$x_{050} = \int_{x_{me}}^{\infty} xp_{x_{me}}(x; x_0, \sigma) dx, \quad \sigma_{50}^2 = \int_{x_{me}}^{\infty} (x - x_{050})^2 p_{x_{me}}(x; x_0, \sigma) dx.$$

Запишем по определению выражение для среднего x_0 и представим его в виде суммы двух интегралов

$$x_0 = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x; x_0, \sigma) dx = \int_{-\infty}^{x_{me}} xp(x; x_0, \sigma) dx + \int_{x_{me}}^{\infty} xp(x; x_0, \sigma) dx. \quad (6.6)$$

Рассмотрим каждый из интегралов, входящих в правую часть равенства (6.6),

$$\int_{-\infty}^{x_{me}} xp(x; x_0, \sigma) dx = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_{me}} x \exp\left[-(x - x_0)^2 / 2\sigma^2\right] dx.$$

Вводим подстановку $z = (x - x_0) / \sigma$, что дает

$$\int_{-\infty}^{x_{me}} xp(x; x_0, \sigma) dx = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[-\exp(-z^2/2) \Big|_{-\infty}^0 + x_0 \int_{-\infty}^0 p(z) dz \right] \quad (6.7)$$

$$= -\sigma / \sqrt{2\pi} + x_0 / 2,$$

$$\int_{x_{me}}^{\infty} xp(x; x_0, \sigma) dx = \frac{1}{2} \int_{x_{me}}^{\infty} xp_{x_{me}}(x; x_0, \sigma) dx = x_{050} / 2 \quad (6.8)$$

Подставляя полученные результаты (6.7) и (6.8) в исходное выражение (6.6), найдем

$$x_0 = x_{050} - 0,80\sigma \quad (6.9)$$

Аналогично получим соотношения и для стандартных отклонений σ и σ_{50} . Запишем

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - x_0)^2 p(x; x_0, \sigma) dx = \int_{-\infty}^{x_{me}} (x - x_0)^2 p(x; x_0, \sigma) dx + \\ &+ \int_{x_{me}}^{\infty} (x - x_0)^2 p(x; x_0, \sigma) dx \end{aligned} \quad (6.10)$$

Рассмотрим каждый из интегралов правой части этого равенства

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{x_{me}} (x - x_0)^2 p(x; x_0, \sigma) dx &= \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_{me}} (x - x_0)^2 \exp\left[-(x - x_0)^2 / 2\sigma^2\right] dx = \\ &= \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 z^2 \exp(-z^2/2) dz = \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \left[-z \exp(-z^2/2) \Big|_{-\infty}^0 + \right. \\ &\left. + \int_{-\infty}^0 \exp(-z^2/2) dz \right] = \sigma^2 / 2 \end{aligned} \quad (6.11)$$

(Введена подстановка $z=(x-x_0)/\sigma$ и произведено интегрирование по частям; использован интеграл Пуассона.)

Выражение (6.11) может быть непосредственно получено исходя из симметричного распределения относительно медианы или среднего значения дисперсии σ^2 для нормального закона в промежутках $-\infty, x_{me} = x_0$ и $x_{me} = x_0, \infty$

$$\int_{x_{me}}^{\infty} (x-x_0)^2 p(x; x_0, \sigma) dx = \int_{x_{me}}^{\infty} (x-x_{050})^2 p(x; x_0, \sigma) dx + (x_{050}-x_0)^2/2 =$$

$$= \frac{1}{2} \int_{x_{me}}^{\infty} (x-x_{050})^2 p_{x_{me}}(x; x_0, \sigma) dx + (0,80\sigma)^2/2 = \sigma_{50}^2/2 + 0,64\sigma^2/2. \quad (6.12)$$

(При преобразованиях использовано полученное выше соотношение (6.9).)

Подставляя полученные результаты (6.11) и (6.12) в исходное выражение (6.10), найдем:

$$\sigma = \frac{\sigma_{50}}{0,60}. \quad (6.13)$$

В работе Г. Крамера [56] даны формулы для моментов нормального усеченного распределения при произвольной точке усечения. При подстановке в них $\xi=x_{me}$ они приводятся к выражениям (6.9) и (6.13).

Перейдем в выражениях (6.9) и (6.13) к выборочным параметрам: $x_0 \sim \bar{x}_n, x_{050} \sim \bar{x}_{n/2}, \sigma \sim s_n, \sigma_{50} \sim s_{n/2}$. Тогда выражения для выборочных параметров x_n и s_n окончательно запишутся так:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_{n/2} - 0,80s_n, s_n = s_{n/2}/0,60, \quad (6.14), (6.15)$$

где оценки параметров $\bar{x}_{n/2}$ и $s_{n/2}$ вычисляются методом моментов по верхней половине ряда $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n/2)}, x'_{(n/2+1)}, \dots, x'_{(n)}$ расположенного в убывающем порядке, по следующим выражениям³:

$$\bar{x}_{n/2} = \left(\sum_{i=1}^{n/2} x_i \right) / (n/2), \quad (6.16)$$

$$s_{n/2} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - \bar{x}_{n/2})^2 \right] / (n/2)}. \quad (6.17)$$

³ Здесь и ниже мы пока оставляем в стороне до специального анализа вопрос о возможной смещенности оценок стандарта, вычисленных по верхней половине ряда

Оценка параметров x_0 и σ методом наибольшего правдоподобия. Напомним, что, как мы указывали в §4 гл.2, оценки параметров методом наибольшего правдоподобия в регулярном случае, т. е. при рассмотрении обычной случайной выборки x_1, x_2, \dots, x_n из некоторой совокупности с неизвестными параметрами $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ находятся следующим образом.

Если распределение дискретно и каждому члену выборки соответствуют вероятности $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$, то функция правдоподобия определяется выражением

$$L = \prod_{i=1}^n P(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k). \quad (6.18)$$

Если распределение непрерывно и каждому члену выборки соответствуют плотности вероятностей $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)$, то функция правдоподобия определяется аналогично

$$L = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k). \quad (6.19)$$

В качестве оценок по принципу наибольшего правдоподобия для параметров $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ принимаются такие оценки, для которых функция L достигает максимума. Таким образом, решение задачи сводится к совместному рассмотрению системы уравнений:

$$\partial L / \partial \theta_1 = 0, \quad \partial L / \partial \theta_2 = 0, \dots, \quad \partial L / \partial \theta_k = 0$$

(для упрощения математических преобразований обычно оперируют не $\partial L / \partial \theta_i$, а с $\partial \log L / \partial \theta_i$).

В случае ранжированной выборки, $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(m)} > \xi$; $x'_{(m+1)}, \dots, x'_{(n)} \leq \xi$ из не полностью определенной совокупности мы имеем дело с нерегулярным случаем, и поэтому функция правдоподобия записывается несколько по-иному (см. [127]). В самом деле, каждому члену верхней части выборки $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(m)}$ мы можем поставить в соответствии плотность вероятностей $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_m)$, а членам нижней части выборки $x'_{(m+1)}, \dots, x'_{(n)}$ — одинаковую, вероятность $P(x \leq \xi)$, так как о каждом из них нам известно, что он попадает в область $\xi \geq x > -\infty$. В результате функция правдоподобия в данном случае выразится так:

$$L = [P(\xi)]^{n-m} \prod_{i=1}^m p(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k), \quad (6.20)$$

где вероятность $P(\xi) = P(x \leq \xi)$.

При нахождении $\max L$, должно учитываться, что вероятность $P(x \leq \xi)$ зависит от параметров $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$; это замечание имеет принципиальное значение.

Обратимся теперь непосредственно к предмету нашего рассмотрения – оценке параметров по выборке из не полностью определенного нормального распределения с точкой усечения $\xi = x_{me}$. Запишем выражение для функции правдоподобия

$$L = [\Phi(x_{me})]^{n/2} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^{n/2} \exp \left\{ - \left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - x_0)^2 \right] / 2\sigma^2 \right\} \quad (6.21)$$

или

$$\ln L = \frac{n}{2} \ln \Phi(x_{me}) - \frac{n}{2} \ln \sqrt{2\pi}\sigma - \left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - x_0)^2 \right] / 2\sigma^2, \quad (6.22)$$

где $\Phi(x_{me}) = P(x \leq x_{me})$

Находим уравнения правдоподобия путем дифференцирования выражения (6.22) по параметрам x_0 и σ и приравнивания производных нулю:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(n/2)} \partial \ln L / \partial x_0 &= \Phi'_{x_0}(x_{me}) / \Phi(x_{me}) + \\ &+ \frac{1}{\sigma^2} \left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - x_0) \right] / (n/2) = 0. \end{aligned} \quad (6.23)$$

Вычислим. Имеем:

$$\Phi(x_{me}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{x_{me}} \exp \left[- \frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2} \right] dx.$$

Дифференцируем $\Phi(x'_{me})$ по x_0 как по параметру:

$$\begin{aligned} \Phi'_{x_0}(x_{me}) &= \int_{-\infty}^{x_{me}} p'_{x_0}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{x_{me}} \exp \left[- (x - x_0)^2 / 2\sigma^2 \right] (x - x_0 / \sigma^2) dx = \\ &= - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[- (x - x_0)^2 / 2\sigma^2 \right] \Big|_{-\infty}^{x_{me}} = -p(x_{me}) = -0,40 / \sigma. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Подставив значение $\Phi'_{x_0}(x_{me})$ в уравнение (6.23), найдем

$$x_0 \sim \bar{x}_n = \bar{x}_{n/2} - 0,80s_{n'} \quad (6.25)$$

где $\bar{x}_{n/2} = \left(\sum_{i=1}^{n/2} x_i \right) / (n/2)$ среднее верхней половины ранжированного ряда; s_n – оценка для σ_n , выражение для нее будет найдено ниже.

Аналогично

$$\begin{aligned} \partial \ln L / (n/2) \partial \sigma &= \Phi'_{\sigma}(x_{me}) / \Phi(x_{me}) - \frac{1}{\sigma} + \\ &+ \left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - x_0)^2 \right] / \sigma^3 (n/2) = 0. \end{aligned} \quad (6.26)$$

Вычислим $\Phi'_{\sigma}(x_{me})$. Имеем

$$\begin{aligned} \Phi(x_{me}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{x_{me}} \exp\left[-(x-x_0)^2/2\sigma^2\right] dx, \\ \Phi'_{\sigma}(x_{me}) &= -\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{x_{me}} \exp\left[-(x-x_0)^2/2\sigma^2\right] dx + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{x_{me}} \exp\left[-(x-x_0)^2/2\sigma^2\right] \cdot (x-x_0)^2/\sigma^3 dx = -\frac{1}{\sigma} \int_{-\infty}^{x_{me}} p(x; x_0, \sigma) dx + \\ &+ \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{x_{me}} (x-x_0)^2 p(x; x_0, \sigma) dx = -1/2\sigma + 1/2\sigma = 0. \end{aligned} \quad (6.27)$$

Подставив значение $\Phi'_{\sigma}(x_{me})$ в уравнение (6.26), найдем:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - x_0)^2 \right] / (n/2) = \left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - x_{050})^2 \right] / (n/2) + (x_{050} - x_0)^2, \\ \sigma \sim s_n &= \frac{s_{n/2}}{0,60}, \end{aligned} \quad (6.28)$$

т. е. с учетом (6.25)

где $s_{n/2} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - \bar{x}_{n/2})^2 \right] / (n/2)}$ – среднеквадратичное отклонение верхней половины ранжированного ряда.

Таким образом, для оценок правдоподобия среднего x_0 и стандартного отклонения σ получили такие же выражения (соотношения 6.25 и 6.28), как при методе моментов (см. 6.14 и 6.15).

Точность вычисления оценок параметров x_0 и σ . Найдем стандартные ошибки оценок параметров: среднего x_0 и стандартного

отклонения σ , вычисленных по выборке из не полностью определенной нормальной совокупности. Проще это сделать, используя аппарат метода наибольшего правдоподобия.

Напомним (см. §3 гл.4), что в регулярном случае при выборочной оценке двух параметров θ_1 и θ_2 по случайной выборке x_1, x_2, \dots, x_n асимптотическое значение дисперсии, скажем оценки θ_1^* , определяется выражениями (4.6) и (4.7). Но очевидно, что, например:

$$M\{\partial^2 \ln p(x; \theta_1, \theta_2) / \partial \theta_1^2\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_1^2};$$

таким же образом могут быть представлены входящие в выражения (4.6) и (4.7) математические ожидания и других производных.

Введем обозначения

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_1^2} = \phi_{11}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} = \phi_{12}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \theta_2^2} = \phi_{22},$$

тогда выражения (4.6) и (4.7) могут быть записаны так:

$$D\theta_1^* = - \frac{1}{1 - \rho^2(\theta_1^*, \theta_2^*)} \frac{1}{n\phi_{11}}, \quad (6.29)$$

$$\rho(\theta_1^*, \theta_2^*) = \frac{\phi_{12}}{[\phi_{11}\phi_{22}]^{\frac{1}{2}}}. \quad (6.30)$$

Найдем значения ϕ_{11} , ϕ_{12} , и ϕ_{22} для нашего случая – для оценок параметров x_0 и σ , вычисленных по выборкам из не полностью определенного нормального распределения. В соответствии с (6.23)

$$\frac{\partial \ln L}{n \partial x_0} = \frac{\Phi'_{x_0}(x_{me})}{2\Phi(x_{me})} + \left[\frac{n/2}{\sum (x_i - x_0)} \right] \sigma^2 n, \quad (6.31)$$

Откуда

$$\frac{\partial \ln L}{n \partial x_0^2} = \frac{\{\Phi'_{x_0}(x_{me})\Phi(x_{me}) - [\Phi'_{x_0}(x_{me})]^2\}}{2[\Phi(x_{me})]^2} - \frac{1}{2}\sigma^2, \quad (6.32)$$

Вычислим значение $\Phi''_{x_0}(x_{me})$. Имеем (см. (6.24))

$$\Phi'_{x_0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{x_{me}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \cdot \left[\frac{x-x_0}{\sigma^2}\right] dx. \quad (6.33)$$

Дифференцируя это выражение еще раз по x_0 и производя элементарное интегрирование, получим

$$\left[\Phi''\right]_{\downarrow}(x_{\downarrow}0)(x_{\downarrow}me) = 0 \quad (6.34)$$

Учитывая (6.24), получим

$$\frac{\partial^2 \ln L}{n} \partial x_0^2 = -\frac{0,82}{\sigma^2}$$

$$\text{и } \Phi_{1_1}(x_{me}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1/n \partial^2 \ln L}{\partial x_0^2} = -0, \frac{82}{\sigma^2}. \quad (6.35)$$

Аналогично учитывая (6.31), запишем

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \ln L}{n \partial x_0 \partial \sigma} &= \frac{\Phi'_{x_0} \sigma(x_{me}) \Phi(x_{me}) - \Phi'_{x_0}(x_{me}) \Phi'_{\sigma}(x_{me})}{2[\Phi(x_{me})]^2} - \\ &- \frac{2}{\sigma^3} \left[\sum^{n/2} (x_i - x_0) \right] / n. \end{aligned} \quad (6.36)$$

Дифференцируя выражение (6.33) по σ и производя элементарное интегрирование, найдем

$$\Phi'_{x_0 \sigma}(x_{me}) = \frac{0,40}{\sigma^2} \quad (6.37)$$

Используя (6.24), (6.27) и (6.25), получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \ln L}{n \partial x_0} \partial \sigma &= \frac{0,40}{\sigma^2} - \frac{2}{\sigma^3} \frac{\left[\sum^{n/2} (x_i - x_0) \right]}{n} \\ \text{и } \Phi_{1_2}(x_{me}) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial x_0 \partial \sigma} = -\frac{0,40}{\sigma^2}. \end{aligned} \quad (6.38)$$

Аналогично (см. (6.26))

$$\frac{\partial \ln L}{n \partial \sigma} = \frac{\Phi'_{\sigma}(x_{me})}{2\Phi(x_{me})} - \frac{1}{2\sigma + \frac{1}{\sigma^3}} \frac{\left[\sum^{n/2} (x_i - x_0)^2 \right]}{n} \quad (6.39)$$

$$\frac{\partial^2 \ln L}{n \partial \sigma^2} = \frac{\{\Phi''(x_{me})\Phi(x_{me}) - [\Phi'(x_{me})]^2\}}{2\Phi[\Phi(x_{me})]} + \frac{1}{2}\sigma^2 - \quad (6.40)$$

и
$$-\frac{3}{\sigma^4} \left[\sum^{n/2} (x_i - x_0) \right] / n.$$

Дифференцируя выражение (6.27) еще раз по σ и произведя элементарное интегрирование, получим

$$\Phi'_\sigma(x_{me}) = 0 \quad (6.41)$$

Учитывая (6.27), найдем

$$\frac{\partial^2 \ln L}{n \partial \sigma^2} = -\frac{1}{2}\sigma^2 - \frac{3}{\sigma^4} \left[\sum^{n/2} (x_i - x_0)^2 \right] / n \quad (6.42)$$

$$\varphi_{2_2}(x_{me}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \frac{\partial^2 \ln L}{\partial \sigma^2} = -\frac{1}{\sigma^2}. \quad (6.43)$$

(использовано исходное выражение для σ^2 при получении соотношения (6.28)).

Теперь у нас все подготовлено, чтобы вычислить стандартные ошибки $\sigma(\bar{x}_n)$ и $\sigma(s_n)$. Вычислим сначала коэффициент корреляции $\rho(\bar{x}_n, s_n)$. Подставив значения $\phi_{1_2}(x_{me})$, $\phi_{1_1}(x_{me})$ и $\phi_{2_2}(x_{me})$ в выражение (6.30), найдем: $\rho(\bar{x}_n, s_n) = -0,44$.

Далее, подставляя значения $\phi_{1_1}(x_{me})$, $\phi_{2_2}(x_{me})$ и $\rho(\bar{x}_n, s_n)$ в выражение (6.29) применительно к оценке \bar{x}_n и выражение, аналогичное ему, применительно к оценке s_n , получим

$$D(\bar{x}_n) = 1,52\sigma^2/n \quad \text{и} \quad \sigma(\bar{x}_n) = 1,23/\sqrt{n}, \quad (6.44)$$

$$D(s_n) = 1,24\sigma^2/n \quad \text{и} \quad \sigma(s_n) = 1,57/\sqrt{2n} \quad (6.45)$$

Точно такие же значения $\rho(\bar{x}_n, s_n)$, $D(\bar{x}_n)$ и $D(s_n)$ приводятся в таблицах А.Хальда [128] для выборок на не полностью определенной нормальной совокупности при точке усечения $\xi = x_{me}$.

Пользуясь формулами (6.44) и (6.45) и полученным значением $\rho(\bar{x}_n, s_n)$ найдем выражение для стандартной ошибки оценки квантиля вероятности превышения x_p , вычисленной по выборке из не полностью определенного нормального распределения.

В общем виде дисперсия $\sigma^2[(x)]^* p_n$ выразится так:

$$\sigma^2[(x)]^*_{p_n} = \sigma^2(\bar{x}_n) \left(\frac{\partial x_p}{\partial x_0} \right)^2 + \sigma^2(s_n) \left(\frac{\partial x_p}{\partial \sigma} \right)^2 + 2\rho(\bar{x}_n, s_n) \sigma(x_n) \sigma(s_n) \left(\frac{\partial x_p}{\partial x_0} \right) \left(\frac{\partial x_p}{\partial \sigma} \right)$$

Но $x_p = x_0 + z_p \sigma$, где z_p – нормированное отклонение для квантилей вероятностей превышения P нормального распределения, откуда $\partial x_p / \partial x_0 = 1, \partial x_p / \partial \sigma = z_p$. В результате получим

$$\sigma(x^*_{p_n}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{1,52 - 1,21z_p + 1,24z_p^2}. \quad (6.46)$$

Таблица 32

Выборочное стандартное отклонение оценок ординат кривых полного и усеченного распределений⁴

Распределение	$\sigma(x^*p)$ для P , %	
	1	0,1
Полное	$\frac{1,93\sigma}{\sqrt{n}}$	$\frac{2,40\sigma}{\sqrt{n}}$
Усеченное	$\frac{2,34\sigma}{\sqrt{n}}$	$\frac{3,10\sigma}{\sqrt{n}}$

Из сопоставления формул (6.44), (6.45) и (4.1), (4.2) следует, что, как и должно быть, усечение распределения приводит к некоторому увеличению случайных ошибок в оценках параметров x_0 и σ . При этом стандартная ошибка $\sigma(\bar{x}_n)$ увеличивается относительно мало – в 1,23 раза, существенно в большей мере происходит увеличение стандартной ошибки $\sigma(s_n)$ – в 1,57 раза. Однако для практических расчетов решающее значение имеют не ошибки в значениях оценок параметров, а ошибки в ординатах кривой распределения, т.е. применительно к рассматриваемой задаче – ошибки в значениях максимальных расходов воды расчетной вероятности превышения P . Последние же, как показывает численное сопоставление результатов расчета по формулам (6.46) и (4.35), приведенное в табл. 32, за счет отрицательного значения коэффициента корреля-

⁴ Название таблицы отсутствует в оригинальной публикации

ции $\rho(\bar{x}_n, s_n) = -0,44$, возрастают относительно не сильно – на 20% для $P=1\%$, на 30% для $P=0,1\%$ (т.е. при вычислении оценок x_p происходит известная компенсация ошибок $\sigma(\bar{x}_n)$ и $\sigma(s_n)$).

В заключение заметим, что результаты математических построений, рассмотренных выше, могут быть использованы для расчетов, например, характеристик дождевых паводков, при которых нормальное распределение непосредственно применяется к логарифмам величин стока.

3. Усеченное гамма-распределение

Выводы выражений для вычисления параметров усеченного гамма-распределения аналогичны выводам для оценок параметров усеченного нормального распределения, поэтому иногда некоторые частные пояснения мы будем опускать.

Нам известны три работы, посвященные оценке параметров усеченного гамма-распределения [113, 114, 118], однако в них выводы не доведены до тех результатов, которые необходимы для практических гидрологических расчетов. По-прежнему, как и в предыдущем параграфе, речь будет идти о выборках из не полностью определенной совокупности с точкой усечения $\xi = x_{me}$.

Оценка параметров x_0 и C_v методом моментов

Итак, пусть мы имеем совокупность с плотностью (1.2). В соответствии с соотношением (6.2) плотность усеченного гамма-распределения выразится так:

$$p_{x_m}(x; x_0, \gamma) = \left(2\gamma^\gamma / \Gamma(\gamma) x_0 \left(\frac{x}{x_0} \right)^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{\gamma x}{x_0} \right) \right) \text{ при } x > x_{me} \quad (6.47)$$

Требуется найти соотношение между моментными оценками параметров исходного распределения (1.2) x_0 и C_v и оценками соответствующих параметров усеченного распределения x_{050} и C_{v50} определяемых выражениями:

$$x_{050} = \int_{x_{me}}^{\infty} x p_{x_{me}}(x; x_0, \gamma) dx \quad (6.48), (6.49)$$

$$C_{v50} = \frac{\sigma_{50}}{x_{050}} \quad (6.50)$$

Найдем выражение для моментной оценки среднего x_0 . Запишем по определению

$$x_0 = \int_0^{\infty} xp(x; x_0, \gamma) dx = \int_0^{x_{me}} xp(x; x_0, \gamma) dx + \int_{x_{me}}^{\infty} xp(x; x_0, \gamma) dx. \quad (6.51)$$

Вычислим каждый из интегралов правой части этого равенства

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} xp(x; x_0, \gamma) dx &= \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)x_0} \int_0^{x_{me}} x \left(\frac{x}{x_0}\right)^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{\gamma x}{x_0}\right) dx = \\ &= \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{x_{me}} \left(\frac{x}{x_0}\right)^\gamma \exp\left(-\frac{\gamma x}{x_0}\right) dx \end{aligned} \quad (6.52)$$

Принимая в качестве $u = \left(\frac{x}{x_0}\right)^\gamma$ и $dv = \exp\left(-\frac{\gamma x}{x_0}\right)$ и интегрируя по частям, получим:

$$\int_0^{x_{me}} xp(x; x_0, \gamma) dx = \frac{x_0}{2} \left[1 - \frac{2}{\gamma} (x_{me}/x_0) p(x_{me}/x_0) \right], \quad (6.53)$$

где $p(x_{me}/x_0)$ – плотность вероятностей (1.2) в точке x_{me}/x_0 .

$$\int_{x_{me}}^{\infty} xp(x; x_0, \gamma) dx = \frac{1}{2} \int_{x_{me}}^{\infty} xp_{x_{me}}(x; x_0, \gamma) dx = x_{0_{50}}/2. \quad (6.54)$$

Объединяем результаты интегрирования (6.53) и (6.54):

$$x_0 = \frac{x_0}{2} \left[1 - \frac{2}{\gamma} \frac{x_{me}}{x_0} p\left(\frac{x_{me}}{x_0}\right) \right] + \frac{x_{0_{50}}}{2},$$

откуда окончательно получим:

$$x_0 = \frac{x_{0_{50}}}{1 + (2/\gamma)(x_{me}/x_0) p(x_{me}/x_0)} = x_{0_{50}} \phi(C_v), \quad (6.55)$$

где введено обозначение

$$\phi(C_v) = \left[1 + (2/\gamma)(x_{me}/x_0) p(x_{me}/x_0) \right]^{-1}. \quad (6.56)$$

Параметр γ связан с коэффициентом изменчивости C_v непосредственно (см. (1.2)), а x_{me}/x_0 также зависит от C_v (эта зависимость может быть численно выражена по таблицам кривых распределения вероятностей превышения для гамма-распределения [11]). Поэтому функция $\phi(C_v)$ без особого труда может быть табулирована.

Применительно к выборочным параметрам выражение (6.55) запишется так:

$$x_0 \sim \bar{x}_n = \bar{x}_{n/2} \phi(C_v), \quad (6.57)$$

где \bar{x}_n – оценка для среднего x_0 , $\bar{x}_{n/2} = \left(\sum^{n/2} x_i \right) / (n/2)$ – среднее арифметическое верхней половины ранжированного в убывающем порядке ряда, принимаемое в качестве оценки для $x_{0.50}$ а значение $\varphi(C_v)$ берется из таблицы, предварительно составленной по выражению (6.56).

Интересно рассмотреть предельный случай, когда $C_v \rightarrow 0$, т.е. когда гамма-распределение стремится к нормальному закону. В этом случае имеем:

$$\left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) \rightarrow 1, p \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) = x_0 p(x_{me}) \rightarrow x_0 \frac{p(0)}{\sigma} = \frac{0,40}{C_v}.$$

(Поскольку мы рассматриваем предельный случай, то естественно, что мы пользуемся равенством $p(x_{me}) = \frac{p(0)}{\sigma} = \frac{0,40}{\sigma}$, справедливым для нормального распределения.)

$$\text{Поэтому } p(x_{me}) = \frac{p(0)}{\sigma} = \frac{0,40}{\sigma}, \text{ т.е. } x_0 \rightarrow \frac{x_{0.50}}{1 + 0,80C_v}.$$

Но это же соотношение вытекает непосредственно и из выражения (6.9) для нормального распределения.

Таким образом, в обоих случаях, как и должно быть, приходим к одному и тому же соотношению между средними полного и усеченного распределения.

Аналогичным подходом установим соотношение между моментными оценками коэффициента изменчивости полного и усеченного распределений – C_v и $C_{v.50}$. Запишем по-прежнему по определению

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (x-x_0)^2 p(x; x_0, \gamma) dx = \int_0^{x_{me}} (x-x_0)^2 p(x; x_0, \gamma) dx + \int_{x_{me}}^{\infty} (x-x_0)^2 p(x; x_0, \gamma) dx. \quad (6.58)$$

Вычислим каждый из интегралов, входящих в это равенство

$$\int_0^{x_{me}} (x-x_0)^2 p(x; x_0, \gamma) dx = \int_0^{x_{me}} x^2 p(x) dx - 2x_0 \int_0^{x_{me}} x p(x) dx + x_0^2 \int_0^{x_{me}} p(x) dx. \quad (6.59)$$

Но

$$\int_0^{x_{me}} x^2 p(x) dx = \frac{x_0^2}{2} \left\{ \frac{\gamma-1}{\gamma} \left[1 - \frac{2}{\gamma} (x_{me}/x_0) p(x_{me}/x_0) \right] - \right. \\ \left. - \frac{2}{\gamma} (x_{me}/x_0)^2 p(x_{me}/x_0) \right\} \quad (6.60)$$

(произведено интегрирование по частям);

$$-2x_0 \int_0^{x_{me}} xp(x) dx = -x_0^2 [1 - (2/\gamma)(x_{me}/x_0)p(x_{me}/x_0)] \quad (6.61)$$

(интеграл был вычислен выше);

$$x_0^2 \int_0^{x_{me}} p(x) dx = x_0^2/2. \quad (6.62)$$

Суммируя полученные интегралы (6.60), (6.61) и (6.62), найдем:

$$\int_0^{x_{me}} (x-x_0)^2 p(x) dx = (x_0^2/2\gamma) \{1 + 2(x_{me}/x_0)p(x_{me}/x_0)[1 - (x_{me}/x_0) - 1/\gamma]\}, \quad (6.63)$$

$$\begin{aligned} \int_{x_{me}}^{\infty} (x-x_0)^2 p(x; x_0, \gamma) dx &= \int_{x_{me}}^{\infty} x^2 p(x) dx - 2x_0 \int_{x_{me}}^{\infty} xp(x) dx + \\ &+ x_0^2 \int_{x_{me}}^{\infty} p(x) dx = \int_{x_{me}}^{\infty} (x-x_{050})^2 p(x) dx + \frac{1}{2}(x_{050}-x_0)^2 = \\ &= \frac{1}{2} \int_{x_{me}}^{\infty} (x-x_{050}) p_{x_{me}}(x) dx + \frac{1}{2}(x_{050}-x_0) = \sigma_{50}^2/2 + (x_{050}-x_0)^2/2. \end{aligned} \quad (6.64)$$

Объединяем интегралы (6.63) и (6.64):

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= (x_0^2/2\gamma) \{1 + 2(x_{me}/x_0)p(x_{me}/x_0)[1 - (x_{me}/x_0) - 1/\gamma]\} + \\ &+ \sigma_{50}^2/2 + (x_{050}-x_0)^2/2. \end{aligned}$$

Откуда после некоторых алгебраических преобразований, при которых использовано выражение (6.55), найдем окончательное соотношение

$$C_{v_{50}} = \frac{C_v \left\{ 1 - 2 \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) p \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) \left[1 - \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) - C_v^2 + 2 C_v^2 \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) p \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) \right] \right\}^{1/2}}{\left[1 + 2 C_v^2 \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) p \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) \right]}. \quad (6.65)$$

Этим соотношением определяется зависимость между коэффициентами изменчивости усеченного распределения $C_{v_{50}}$ и полного распределения C_v .

При оперировании с выборочными значениями $C_{v_{n/2}}$ и C_{v_n} в соотношении (6.65) производится следующая замена: $C_{v_{50}} \sim C_{v_{n/2}}$ и $C_v \sim C_{v_n}$.

При практических расчетах сначала по верхней половине ранжированного ряда вычисляется значение $C_{v_{n/2}}$ по формуле

$$C_{v_{n/2}} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n/2} (x_i - \bar{x}_{n/2})^2 \right] / (n/2) \bar{x}_{n/2}^2} \quad (6.66)$$

где $\bar{x}_{n/2} = \left(\sum_{i=1}^{n/2} x_i \right) / (n/2)$ – среднее арифметическое верхней половины ранжированного ряда, а затем по зависимости (6.65), представленной в виде графика или таблицы, осуществляется переход к значению C_{v_n} .

Как и при анализе средних значений $x_{0.50}$ и x_0 рассмотрим предельный случай, когда $C_v \rightarrow 0$, т. е. когда гамма-распределение стремится к нормальному.

Полагая $\left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) \rightarrow 1$, $p \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) = 0,40 C_v$, из зависимости (6.65) получим $C_{v_{50}} = \frac{0,60 C_v}{1 + 0,80 C_v}$. Но при $C_v \rightarrow 0$ (с учетом выражения (6.9)) это

же соотношение получаем и из формулы (6.13).

Таким образом, в обоих случаях, как и должно быть, приходим к одному и тому же соотношению между значениями C_v и $C_{v_{50}}$.

Оценка параметров x_0 и C_v методом наибольшего правдоподобия. Так же, как и для нормального распределения, аналогично строим функцию правдоподобия для ранжированной выборки $x_{(1)}, x_{(2)}, x_{(3)}, \dots, x_{(n/2)}, x'_{(n/2+1)}, \dots, x'_{(n)}$ из неполностью определенного гамма-распределения

$$L = [F(x_{me})]^{n/2} \left[\gamma^\gamma / \Gamma(\gamma) x_0 \right]^{n/2} \exp \left[-\gamma \sum_{i=1}^{n/2} (x_i / x_0) \right] \prod_{i=1}^{n/2} (x_i / x_0)^{\gamma-1} \quad (6.67)$$

$$\begin{aligned} \ln L = & (n/2) \ln F(x_{me}) + (n/2) \gamma \ln \gamma - (n/2) \ln \Gamma(\gamma) - (n/2) \ln x_0 - \\ & - \gamma \sum_{i=1}^{n/2} (x_i / x_0) + (\gamma - 1) \sum_{i=1}^{n/2} \ln (x_i / x_0), \end{aligned} \quad (6.68)$$

где вероятность $F(x_{me}) = P(x \leq \xi)$.

Найдем оценку правдоподобия для среднего x_0

$$\partial \ln L / (n/2) \partial x = F'(x_{me}) / F(x_{me}) - \gamma / x_0 + (\gamma / x_0^2) \left(\sum_{i=1}^{n/2} x_i \right) / (n/2) = 0 \quad (6.69)$$

Вычислим $F'(x_{me})$. Имеем

$$F(x_{me}) = \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)x_0} \int_0^{x_{me}} (x/x_0)^{\gamma-1} \exp(-\gamma x/x_0) dx.$$

Дифференцируем это выражение по x_0

$$\begin{aligned} F'_{x_0}(x_{me}) &= \int_0^{x_{me}} p'_{x_0}(x) dx = \\ &= -\frac{1}{2} \frac{\gamma}{x_0} + \frac{\gamma}{2x_0} \left[1 - \frac{2}{\gamma} (x_{me}/x_0) p(x_{me}/x_0) \right] = -\frac{1}{x_0} (x_{me}/x_0) p(x_{me}/x_0) \end{aligned} \quad (6.70)$$

(при вычислении использовано выражение для интеграла $\int_0^{me} xp(x; x_0, \gamma) dx$).

Подставляя значение $F'_{x_0}(x_{me})$ в (6.69), найдем

$$x_0 \sim \bar{x}_n = \frac{\bar{x}_{n/2}}{\left[1 + (2/\gamma)(x_{me}/x_0) p(x_{me}/x_0) \right]} = \bar{x}_{n/2} \phi(C_v), \quad (6.71)$$

где $\bar{x}_{n/2} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n/2} x_i \right)}{(n/2)}$ – среднее арифметическое верхней половины ранжированного ряда,

$$\phi(C_v) = \left[1 + \left(\frac{2}{\gamma} \right) \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) p \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) \right]^{-1}. \quad (6.72)$$

(функция $\phi(C_v)$ легко может быть табулирована) (табл. 33).

Таким образом, для оценки правдоподобия среднего x_0 получили выражение, совпадающее с выражением (6.57), установленным при использовании метода моментов.

Из (6.71) следует, что оценкой правдоподобия для среднего усеченного гамма-распределения x_{050} как и для неусеченного распределения [10, 61], служит среднее арифметическое.

Найдем оценку правдоподобия для коэффициента изменчивости C_v . Дифференцируем выражение (6.68) по γ :

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \gamma} = F'_{\gamma}(x_{me}) F(x_{me}) + \ln \gamma + 1 - \frac{d}{d\gamma} \ln \Gamma(\gamma) + \frac{\left[\sum_{i=1}^{n/2} \frac{x_i}{x_0} \right]}{n/2} - \frac{\sum_{i=1}^{n/2} x_i}{(x_0 n)/2} = 0. \quad (6.73)$$

Вычислим $F'_{\gamma}(x_{me})$. Имеем

$$F(x_{me}) = \int_0^{x_{me}} p(x, x_0, \gamma) dx = \frac{\gamma^{\gamma}}{\Gamma(\gamma)x_0} \int_0^{x_{me}} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{\gamma x}{x_0}\right) dx$$

и

$$F'_{\gamma}(x_{me}) = \int_0^{x_{me}} p'_{\gamma}(x, x_0, \gamma) dx \quad (6.74)$$

Произведя дифференцирование плотности по параметру γ , найдем

$$p'_{\gamma}(x, x_0, \gamma) = \left[1 + \ln \gamma - \frac{d}{d\gamma} \ln \Gamma(\gamma) - \frac{x}{x_0} + \ln \left(\frac{x}{x_0} \right) \right] p(x, x_0, \gamma).$$

Подставим значение $p'_{\gamma}(x, x_0, \gamma)$ в (6.74):

$$F'_{\gamma}(x_{me}) = \int_0^{x_{me}} \left[1 + \ln \gamma - \frac{d}{d\gamma} \ln \Gamma(\gamma) - \frac{x}{x_0} + \ln \left(\frac{x}{x_0} \right) \right] p(x, x_0, \gamma) dx. \quad (6.75)$$

Таблица 33

Значения функции (6.72)*

C_v	$\varphi(C_v)$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,1	0,925	0,919	0,913	0,906	0,900	0,894	0,887	0,882	0,875	0,869
0,2	0,863	0,858	0,852	0,847	0,841	0,836	0,831	0,825	0,820	0,814
0,3	0,809	0,805	0,800	0,795	0,791	0,787	0,782	0,777	0,773	0,769
0,4	0,764	0,760	0,756	0,751	0,747	0,743	0,739	0,735	0,730	0,726
0,5	0,722	0,719	0,715	0,712	0,708	0,705	0,702	0,698	0,695	0,691
0,6	0,688	0,685	0,681	0,678	0,674	0,671	0,668	0,664	0,661	0,657
0,7	0,654	0,652	0,649	0,647	0,645	0,643	0,640	0,638	0,636	0,633
0,8	0,631	0,629	0,627	0,624	0,622	0,620	0,618	0,616	0,613	0,611
0,9	0,609	0,607	0,605	0,604	0,602	0,600	0,598	0,596	0,595	0,593
1,0	0,591	0,589	0,588	0,586	0,585	0,583	0,581	0,580	0,578	0,577
1,1	0,575	0,574	0,572	0,571	0,569	0,568	0,567	0,565	0,564	0,562
1,2	0,561	0,560	0,559	0,558	0,557	0,556	0,554	0,553	0,552	0,551
1,3	0,550	0,549	0,548	0,547	0,546	0,545	0,544	0,543	0,542	0,541
1,4	0,540	0,539	0,538	0,538	0,537	0,536	0,535	0,534	0,534	0,533
1,5	0,532	0,531	0,530	0,530	0,529	0,528	0,528	0,527	0,526	0,526
1,6	0,526	0,525	0,525	0,524	0,524	0,523	0,522	0,522	0,521	0,521
1,7	0,520	0,520	0,519	0,519	0,518	0,518	0,518	0,517	0,517	0,516
1,8	0,516	0,516	0,515	0,515	0,514	0,514	0,513	0,513	0,513	0,512
1,9	0,512	0,512	0,511	0,511	0,511	0,511	0,510	0,510	0,510	0,509
2,0	0,509	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* Название таблицы отсутствует в оригинальной публикации

Вычисление первых трех интегралов в этом выражении элементарно. Выражение для интеграла $\int_0^{x_{me}} xp(x; x_0, \gamma) dx$ было использовано выше. Интеграл $\int_0^{x_{me}} \ln\left(\frac{x}{x_0}\right) p(x, x_0, \gamma) dx$ требует специального вычисления.

Рассмотрим интеграл

$$\frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)x_0} \int_0^{t_1} \ln\left(\frac{\gamma x}{x_0}\right) \left(\frac{x}{x_0}\right)^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{\gamma x}{x_0}\right) dx.$$

Выберем $t_1 = x_{me}$ и примем $z = \gamma(x/x_0)$, тогда из него получим:

$$\int_0^{x_{me}} \ln\left(\frac{x}{x_0}\right) p(x, x_0, \gamma) dx = \frac{\gamma^\gamma}{\Gamma(\gamma)x_0} \int_0^{x_{me}} \ln\left(\frac{x}{x_0}\right) \left(\frac{x}{x_0}\right)^{\gamma-1} \exp\left(-\frac{\gamma x}{x_0}\right) dx = \quad (6.76)$$

где

$$\frac{t = const}{\Gamma_t'(\gamma)} = \int_0^t z^{\gamma-1} \ln z \exp(-z) dz, \quad (6.77)$$

при $t = \gamma(x/x_0)$.

С учетом полученного выражения (6.76):

$$F_\gamma'(x_{me}) = -\frac{1}{2} \frac{d}{d\gamma} \ln \Gamma(\gamma) + \frac{1}{\gamma} \ln\left(\frac{x_{me}}{x_0}\right) p(x, x_0, \gamma) + \frac{t = const}{\Gamma_t'(\gamma)}. \quad (6.78)$$

Подставляя значение $F_\gamma'(x_{me})$ в равенство (6.73) и производя соответствующие преобразования с учетом выражения (6.71), найдем окончательное выражение для статистики $\lambda_{2_{n/2}}$ через которую выражается значение коэффициента изменчивости C_v , а именно:

$$\lambda_{2_{n/2}} = 2 \left[\frac{d}{d\gamma} \ln \Gamma(\gamma) - \frac{t = const}{\Gamma_t'(\gamma)} \right] - \ln \gamma - \ln \left[1 + \left(\frac{2}{\gamma} \right) \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) p \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) \right], \quad (6.79)$$

где $\left[\lambda_{2_{n/2}} = \sum_{n/2}^{n/2} \frac{x_i}{\bar{x}_{n/2}} \right]$, $\bar{x}_{n/2} = \frac{\sum_{n/2}^{n/2} x_i}{n/2}$ – статистики, вычисляются по верхней половине ранжированного ряда; $\gamma = 1/$, $C - \nu - 2$;

$$\frac{t = const}{\Gamma_t'(\gamma)} = \int_0^t z^{\gamma-1} \ln z \exp(-z) dz, \text{ при } t = \gamma \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right).$$

Таким образом, как и для полного распределения, для усеченного гамма-распределения оценка правдоподобия коэффициента изменчивости C_v определяется через статистику λ_2 .

Зависимость (6.79) между C_v и $\lambda_{2n/2}$ может быть табулирована, поэтому практическое вычисление оценки коэффициента изменчивости по ней технически несложно. Главное затруднение при составлении табл. 34 между C_v и $\lambda_{2n/2}$ по зависимости (6.79) состоит в вычислении интеграла
$$\Gamma'_t(\gamma) \quad t=const$$

При составлении приводимой ниже таблицы было использовано следующее разложение для $\Gamma'_t(\gamma)$
$$\Gamma'_t(\gamma) = \int_0^t z^{\gamma-1} \exp(-z) dz = \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^k t^{k+\gamma}}{k! (k+\gamma)} \right]. \quad (6.80)$$

Продифференцировав его по γ , считая условно $t=const$, получим нужное нам разложение:

$$\Gamma'_t(\gamma) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k t^{k+\gamma}}{k! (k+\gamma)^2} [(k+1) \ln t - 1]. \quad (6.81)$$

Порядок расчетов при использовании усеченного гамма-распределения очевиден: сначала по выражению (6.79) вычисляется оценка C_v , а затем по выражению (6.71) находится оценка x_0 . Значения зависимостей⁵ $\varphi(C_v)$ и $C_v=f(\lambda_{2n/2})$ приведены в табл. 33 и 34. При использовании этих таблиц практические расчеты просты; тем не менее при массовой обработке материалов, конечно, желательно использование ЭВМ.

Точность вычисления оценок параметров x_0 и C_v

Установление выражений для стандартных ошибок оценок правдоподобия параметров: среднего x_0 и коэффициента C_v и квантилей различной вероятности x_p усеченного (не полностью определенного) гамма-распределения регулярным приемом, который был использован при решении этой задачи в §2 для нормального распределения, сопряжено со сложными и громоздкими математическими преобразованиями; к тому же, как можно заведомо ожидать численное представление конечных результатов по этим зависимостям будет ослож-

⁵ Табулирование зависимости (6.79) произведено 3.Ф. Волковой на БЭСМ-3М.

Значения функции $C_{\nu} = f(\lambda_{2, n/2})$

C_{ν}	$\lambda_{2, n/2}$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,10	0,00050	0,00070	0,00090	0,00110	0,00130	0,00150	0,00170	0,00190	0,00210	0,00230
0,20	0,00250	0,00281	0,00321	0,00343	0,00374	0,00405	0,00436	0,00467	0,00498	0,00529
0,30	0,00560	0,00608	0,00656	0,00704	0,00752	0,00800	0,00848	0,00896	0,00944	0,00992
0,40	0,0104	0,0109	0,0114	0,0119	0,0124	0,0129	0,0135	0,0142	0,0148	0,0154
0,50	0,0161	0,0168	0,0176	0,0183	0,0191	0,0198	0,0206	0,0213	0,0220	0,0228
0,60	0,0235	0,0243	0,0250	0,0259	0,0267	0,0275	0,0282	0,0290	0,0298	0,0306
0,70	0,0314	0,0324	0,0328	0,0335	0,0342	0,0349	0,0358	0,0366	0,0375	0,0383
0,80	0,0392	0,0400	0,0409	0,0417	0,0426	0,0434	0,0444	0,0453	0,0463	0,0473
0,90	0,0482	0,0493	0,0503	0,0514	0,0524	0,0534	0,0545	0,0556	0,0568	0,0579
1,00	0,0590	0,0601	0,0613	0,0624	0,0636	0,0647	0,0659	0,0670	0,0682	0,0693
1,10	0,0704	0,0718	0,0731	0,0744	0,0758	0,0771	0,0785	0,0799	0,0813	0,0828
1,20	0,0842	0,0856	0,0871	0,0886	0,0901	0,0916	0,0932	0,0948	0,0964	0,0980
1,30	0,0995	0,101	0,103	0,105	0,106	0,108	0,110	0,112	0,113	0,115
1,40	0,117	0,119	0,121	0,122	0,124	0,126	0,128	0,130	0,132	0,134
1,50	0,136	0,137	0,139	0,141	0,143	0,145	0,147	0,149	0,151	0,154
1,60	0,156	0,158	0,160	0,162	0,164	0,166	0,168	0,170	0,173	0,175
1,70	0,177	0,180	0,183	0,185	0,188	0,190	0,193	0,195	0,197	0,200
1,80	0,202	0,205	0,207	0,210	0,213	0,215	0,217	0,220	0,222	0,224
1,90	0,227	0,229	0,231	0,234	0,236	0,238	0,241	0,245	0,248	0,251
2,00	0,254									

Примечание. Таблица составлена применительно к десятичным логарифмам; значения $\lambda_{2, n/2}$ отрицательные.

нено трудоемкими расчетами. Поэтому для установления численных значений $\sigma(\bar{x}_n)$, $\sigma(C_{v,n}^*)$ и $[(x)]_{p,n}^*$ мы используем результаты специально выполненных расчетов методом статистических испытаний.

Были смоделированы и обработаны 100 случайных независимых выборок объемом $n=50$ членов из совокупности с гамма-распределением с параметрами: $x_0=1, 0$, $C_v=0,50$ и $1,0$. По каждой выборке были вычислены в обычном порядке оценки параметров x_0 и C_v методом моментов и методом наибольшего правдоподобия и найдены оценки правдоподобия и при использовании лишь верхней половины выборки. Затем по соответствующим оценкам параметров были получены оценки квантилей вероятности превышения $P=1$ и $0,1\%$, для всех полученных совокупностей оценок вычислены средние и стандартные ошибки. Сводные результаты выполненных расчетов представлены в табл. 35.

Рассмотрим основные результаты этих расчетов.

Прежде всего отметим, что поскольку общая численность выборок сравнительно невелика (100 выборок), то полученные значения стандартных ошибок приближены (ср. с соответствующими результатами расчетов, приведенными в §3 и 7 гл.4), и поэтому мы их будем использовать лишь для сопоставительных целей. Для получения точных значений ошибок должны быть выполнены расчеты, значительно большие по своему объему.

Как следует из табл. 35, оценки \bar{x} , C_v^* и x_p^* усеченного гамма-распределения, так же, как и соответствующие оценки полного распределения, по существу не смещены. Далее, рассеяние оценок среднего x_0 практически одинаково, рассеяние оценок коэффициента изменчивости C_v для усеченного распределения несколько больше, чем для полного. Однако, как уже отмечалось в §1, для расчета максимальных расходов воды решающее значение имеет сопоставление ошибок оценок квантилей x_p . При этом для нас важно сопоставить погрешности в оценках квантилей для следующих двух вариантов расчета:

- полное гамма-распределение при оценке его параметров x_0 и C_v методом моментов;
- усеченное гамма-распределение при оценке его параметров x_0 и C_v методом наибольшего правдоподобия. (Сопоставление именно этих вариантов расчетов вызвано тем, что в настоящее время

Таблица 35

Распределение	Метод	\bar{x}	$\sigma(\bar{x})$	\bar{C}_v	$\sigma(C_v)$	x_p	\bar{x}_p^*	$[(\sigma(x)_p)^*]$	x_p	\bar{x}_p^*	$[(\sigma(x)_p)^*]$
						$P=0,1\%$			$P=1\%$		
$C_v = 0,50$											
Полное	моментов	1,00	0,079	0,49	0,053	3,27	3,24	0,42	2,57	2,49	0,29
	наибольшего правдоподобия	1,00	0,079	0,49	0,047	3,27	3,24	0,39	2,57	2,50	0,27
Усеченное	наибольшего правдоподобия	1,00	0,086	0,48	0,081	3,27	3,19	0,49	2,57	2,45	0,32
$C_v = 1,0$											
Полное	моментов	1,00	0,158	0,97	0,130	6,91	6,71	1,53	4,60	4,48	0,93
	наибольшего правдоподобия	1,00	0,158	0,98	0,085	6,91	6,77	1,28	4,60	4,52	0,80
Усеченное	наибольшего правдоподобия	1,00	0,161	0,96	0,174	6,91	6,63	1,62	4,60	4,44	0,95

при практических расчетах максимального стока с применением полного гамма-распределения для оценки коэффициента изменчивости C_v используется метод моментов, а не метод наибольшего правдоподобия.)

Как следует из табл. 35, значения ошибок $[(\sigma(x)_p)^*]$ и выборочные распределения x_p^* для указанных вариантов практически совпадают. Таким образом, использование усеченного гамма-распределения по существу не ведет к уменьшению точности установления расчетных величин максимальных расходов воды. Этот вывод имеет важное практическое значение при обосновании целесообразности использования усеченного гамма-распределения для расчета максимумов весеннего половодья.

Пример построения усеченного гамма-распределения для вычисления максимальных расходов воды малой вероятности превышения.

Рассмотрим данные наблюдений за максимальными расходами воды весеннего половодья р. Белой у г. Уфы ($n=87$) (табл. 36). Требу-

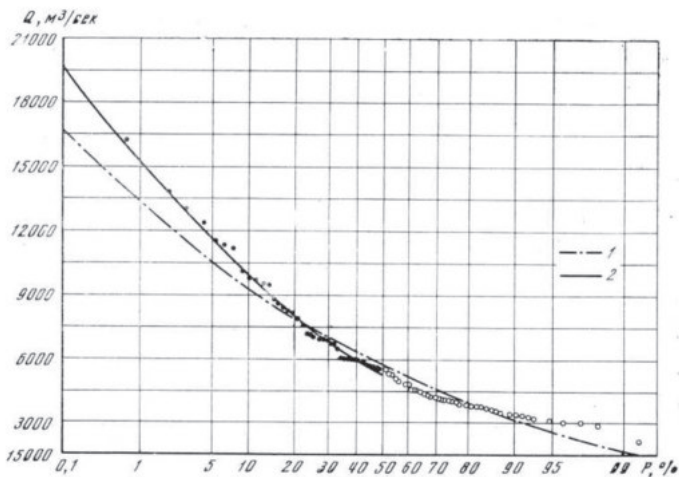
Таблица 36

x_i м ³ /сек (в убывающем порядке)	Годы	$\frac{x_i}{\bar{x}_{n/2}}$	$\lg \frac{x_i}{\bar{x}_{n/2}}$	$x_i^{x_i}$ м ³ /сек (в убывающем порядке)	Годы	$\frac{x_i}{\bar{x}_{n/2}}$	$\lg \frac{x_i}{\bar{x}_{n/2}}$
16200	1882	1,992	0,29929	7070	1964	0,869	1,93902
13800	1916	1,697	0,22968	7020	1892	0,863	1,93601
13000	1914	1,599	0,20385	6900	1932	0,849	1,92891
12400	1899	1,525	0,18327	6880	1949	0,846	1,92737
11500	1927	1,414	0,15045	6800	1941	0,836	1,92221
11400	1947	1,402	0,14674	6500	1894	0,799	1,90255
11200	1926	1,377	0,13893	6160	1908	0,758	1,87967
10170	1888	1,251	0,09726	6160	1912	0,758	1,87967
9820	1923	1,208	0,08207	6120	1922	0,753	1,87680
9660	1919	1,188	0,07482	6080	1879	0,748	1,87390
9580	1957	1,178	0,07115	6040	1917	0,743	1,87099
9540	1902	1,173	0,06930	6000	1925	0,738	1,86806
8760	1946	1,077	0,03222	6000	1898	0,738	1,86806
8630	1880	1,060	0,02531	5930	1878	0,729	1,86273
8420	1929	1,035	0,01494	5860	1951	0,721	1,85794
8320	1948	1,023	0,00988	5770	1913	0,710	1,85126
8180	1963	1,006	0,00260	5740	1886	0,706	1,84880
8040	1887	0,989	1,99520	5740	1897	0,706	1,84880
7960	1903	0,979	1,99078	5590	1920	0,687	1,83696
7560	1943	0,930	1,96848	5590	1901	0,687	1,83696
7250	1942	0,892	1,95036				
7220	1889	0,888	1,94841				
7100	1959	0,873	1,94101	349660	-	43,0	-0,75733

ется вычислить расчетные максимальные расходы воды различной вероятности превышения в этом створе с помощью усеченного гамма-распределения.

Вычисляем сначала по верхней половине ряда, расположенного в убывающем порядке, среднее $\bar{x}_{n/2}$ (см. выражение (6.71)) и статистику $\lambda_{2/n/2}$ (см. выражение (6.79)); подготовительные вычисления даны в табл. 36:

$$\frac{\bar{x}_n}{2} = \frac{\sum_{n/2}^{n/2} x_i}{n/2} = 349660/43 = 8132 \text{ м}^3/\text{сек},$$



Совмещенные кривые распределения вероятностей превышения максимальных расходов весеннего половодья 1 – полное, 2 – усеченное распределение (р. Белая, г. Уфа, 1878–1964 гг.)

$$\lambda_{2n/2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n/2} \lg \left(\frac{x_i}{\bar{x}_{n/2}} \right) \right]}{n/2} = \frac{0,75733}{43} = -0,0176.$$

По полученному значению $\lambda_{2n/2} = -0,0176$ по табл. 34 находим, что $\lambda_{2n/2}$ соответствует значению коэффициента изменчивости $C_{v_n} = 0,52$.

Далее, зная среднее и определив с помощью вычисленного значения C_v по табл. 34 функцию $[(\varphi(C))_v]$, по выражению (6.7) находим значение среднего \bar{x}_n :

$$\bar{x}_n = \bar{x}_{n/2} \varphi(C_v) = 8132 \cdot 0,715 = 5814 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

По полученным значениям \bar{x}_n и C_{v_n} в обычном порядке, используя таблицу ординат трехпараметрического гамма-распределения, строим верхнюю часть распределения – усеченное распределение (рис.). Как следует из рис., теоретическая кривая хорошо соответствует эмпирическим точкам (эмпирическая вероятность превышения при этом построении вычислена по формуле автора).⁶

⁶ *Примечание редактора* (С.Н. Крицкого). Расположение эмпирических точек на рис. 36 показывает, что выборочное распределение, по которому проведено построение, характеризуется более высокой асимметрией, чем принятое соотношение $C_s = 2C_v$. Этим объясняется отклонение полной кривой от точек, изображающих наблюдения. Улучшить соответствие можно было бы не только усечением кривой, но также повышением коэффициента асимметрии полной кривой. Вообще же при глазомерной оценке

соответствия наблюдениям теоретических распределений следует учитывать соображения, высказанные в примечании к гл. 2, § 3.

Е.Г. Блохинов слишком благоприятно оценивает достоинства приема усечения распределений. Исследования, выводы которых представлены в табл. 35, показывают, что стандартные ошибки квантилей вероятностью превышения 0,1 и 1%, оцененных методом наибольшего правдоподобия, существенно меньше при использовании полного гамма-распределения, чем при его усечении. Благоприятный для метода усечения вывод Е.Г. Блохинова основывается на сопоставлении ошибок усеченного распределения, оцененного методом максимального правдоподобия с ошибками полного распределения, оцененного методом моментов. Такой, несколько искусственный, подход обосновывается ссылкой на современную практику. Однако, казалось бы, сопоставление, проведенное Е.Г. Блохиновым, могло бы служить основанием для вывода, что сложившаяся практика требует пересмотра, т. е. что при расчете максимального стока параметры полного гамма-распределения целесообразно оценивать методом наибольшего правдоподобия, а не методом моментов. При таком подходе точность оценки высоких квантилей методом усечения не выдерживает сопоставления с точностью построения полных распределений. Область целесообразного применения усеченных распределений к описанию колебаний речного стока требует дальнейшего исследования. Можно полагать, что использование метода усечения окажется целесообразным в применении к очень асимметричным распределениям, асимметрия которых выходит за границы соотношений, охвачен таблицами трехпараметрического гамма-распределения.

Будаговский Анатолий Иванович

(18.5.1912 – 1.10.2008)

Анатолий Иванович Будаговский – крупнейший учёный-гидролог, известный специалист в области исследований процессов формирования почвенных вод, создатель нового научного направления в этой области, доктор географических наук.

А.И. Будаговский родился 18 мая 1912 г. в небольшом селе Подбелец Мценского района Орловской области, в семье учителя. В 1928 г. окончил среднюю школу в г. Мценск; в 1931 г. краткосрочные курсы гидрометров при Центральном научно-исследовательском институте транспортно-



строительства. По окончании курсов до января 1932 г. работал в этом же институте в должности младшего техника, а затем техника-гидрометра. В январе 1932 г. перешёл на работу в Московский областной Гидрокомитет, где работал в должности техника и старшего техника - гидролога.

В 1937 г. окончил гидрологический факультет Московского гидрометеорологического института по специальности «гидролог-речник», которая и определила всю его дальнейшую профессиональную судьбу.

По окончании института с 1937–39 гг. работал в Московском управлении Гидрометслужбы; в сентябре 1939 г. перешёл на работу в проектно-изыскательскую контору «Трансмостпроект» Министерства путей сообщения СССР.

В июле 1941 г. был направлен в распоряжение Главного управления гидрометеорологической службы Красной Армии (ГУГМС КА), где получил назначение на должность начальника гидрологического отдела Туркменского управления Гидрометслужбы. В сентябре

1942 г. по распоряжению ГУГМС КА был призван в ряды Красной Армии и направлен для прохождения службы в распоряжение штаба 1-й Гвардейской армии, где работал в должности начальника гидрометеорологического отделения оперативного отдела штаба армии. В 1943 г. был назначен начальником восстановительной партии отряда ГУГМС КА, в которой проработал до 1944 г.

А.И. Будаговский находился в действующей армии до конца войны, награждён орденом Отечественной войны II-й степени и 5-ю боевыми медалями. Только после демобилизации в феврале 1946 г. он смог заняться наукой – делом, которое стало главным смыслом его жизни.

С 1946 г. А.И. Будаговский – сотрудник научных организаций системы академии наук: Белорусской (Водохозяйственный сектор АН БССР, 1946–48 гг.); с апреля 1948 г. – Академии наук СССР (в 1991 г. переименована в Российскую академию наук). Два академических института могут претендовать на честь считать его своим сотрудником: Институт географии РАН (1948–68 гг.) и Институт водных проблем РАН (1968–08 гг.)

В 1952 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование процесса инфильтрации воды в почву»; в декабре 1964 г. докторскую диссертацию «Испарение почвенной влаги». С 1968 г. до своей кончины (2008 г.) – заведующий, а затем главный научный сотрудник созданной им Лаборатории физики почвенных вод Института водных проблем РАН, в которой им лично и под его руководством проводился целый ряд оригинальных теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением механизма переноса воды, тепла и радиации в системе «почва – растительный покров – атмосфера».

А.И. Будаговский – широко признанный в нашей стране и за рубежом учёный в области исследований суммарного испарения и его составляющих; водного баланса и формирования влагозапасов почв, их экологической роли; процессов испарения почвенной влаги и зависимости этих процессов от комплекса внешних условий и биологических факторов, количественной теории фотосинтеза и др.

Благодаря яркому таланту, поразительному трудолюбию, целеустремленности и научной бескомпромиссности, А.И. Будаговский внёс заметный вклад в развитие гидрологии суши, создав новое

научное направление – учение о почвенных водах. А.И. Будаговский – общепризнанный авторитет в области исследований процессов формирования почвенных вод и их экологической роли. Наряду с Х.Л. Пенманом он является автором современной количественной теории суммарного испарения агрофитоценозов. А.И. Будаговский стоял у истоков междисциплинарного направления в экологии суши – формирования продукционного процесса наземных экосистем, фактически являлся посредником между учёными, занимающимися двумя существенно разными дисциплинами: физиологией растений и физикой переноса радиации и тепла в приземном слое атмосферы.

А.И. Будаговским опубликовано более 80 научных работ, в том числе 2 монографии: «Впитывание воды в почву» (1955 г.), «Испарение почвенной влаги» (1964 г.). Его работы известны далеко за пределами России. А.И. Будаговский сыграл решающую роль в становлении геофизического направления в формировании гидрологического цикла суши, связанного с изучением процессов тепло-влагообмена на водосборе, не только в российском научном сообществе, но и за рубежом. Более 40 лет он поддерживал тёплые, искренние отношения со специалистами Института гидрологии Словацкой академии наук и творческие контакты в области влаго – теплопереноса в системе «почва – растительный/снежный покров – атмосфера».

Авторитет А.И. Будаговского позволил ему стать руководителем двух крупных международных проектов, разрабатывавшихся по заданию Международного комитета по планетарным геофизическим исследованиям в рамках многостороннего сотрудничества академий наук социалистических стран.

А.И. Будаговский – лауреат Государственной научной стипендии России, Премии МАИК «Наука» за лучшие публикации в журналах этого издательства (1997 г.), неоднократно награждался почётными грамотами АН СССР и РАН.

Е.М. Гусев (ИВП РАН)

Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова¹

Будаговский А.И.

Уравнение баланса почвенных вод

Для любого слоя почвы при наличии растительного покрова уравнение водного баланса с учетом сложившихся традиций выбора положительного направления потоков можно записать в виде

$$\frac{\partial W}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial E_{\text{п}}}{\partial z} + \frac{\partial Q_{\text{р}}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Здесь W – влажность почвы, измеряемая в единицах массы воды, содержащейся в единице объема; Q – поток воды в почве; $E_{\text{п}}$ – поток водяного пара; $Q_{\text{р}}$ – поток воды, движущейся через корни растений (все они, включая $Q_{\text{р}}$, отнесены к единице площади поперечного сечения почвы); z – вертикальная координата, направленная от поверхности почвы вниз; t – время.

Запись уравнения (1) соответствует случаю, когда перенос воды в жидком и парообразном виде происходит только в вертикальном направлении, а поперечные составляющие потоков отсутствуют или ими можно пренебречь.

Произведение $(\partial Q_{\text{р}}/\partial z)\delta z$ равно величине поглощения воды корнями растений из прямоугольного параллелепипеда, площадь основания которого равна единице, а высота δz . Основная роль в поглощении принадлежит корневым волоскам. Диаметр их у различных видов растений изменяется в пределах 5–17, а длина 80–1500 мкм. Однако количество корневых волосков даже у молодых растений огромно, и общая поверхность корней на два порядка и более превышает поверхность надземной части растений. Продолжительность активной деятельности корневых волосков большинством авторов оценивается в 1 сут.; взамен отмерших отрастают новые. Огромная протяженность и поверхность корневой системы, значительная подвижность ее наиболее активной части позволяют растению довольно совершенно использовать существенно рассеянную в пространстве почвенную воду. При значительном снижении

¹ Будаговский А.И. Ресурсы почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова // Водные ресурсы, 1985, №4, стр. 3–13.

увлажнения верхних слоев почвы корневая система относительно быстро проникает в ее более глубокие слои, если они содержат большее количество воды. С другой стороны, поглощение воды корневой системой, развитой на достаточную глубину, резко снижается в ее нижней части и падает практически до нуля при повышении уровня грунтовых вод вследствие ухудшения условий аэрации, хотя масса корней здесь длительное время остается постоянной. Таким образом, между распределением массы корней по глубине и поглощением ими воды не существует и не может существовать однозначной связи.

Непосредственное определение распределения поглощения воды корнями растений по глубине в принципе возможно [3], но пока не накоплены материалы для построения соответствующих обобщенных зависимостей. Поэтому необходимо принять одну из гипотетических зависимостей $Q_p = Q_p(z)$. Предпочтение следует отдать простейшей из них, приняв ее линейной, что упрощает последующие построения и их проверку.

Из принятого предположения вытекает представление о достаточно четкой границе корнеобитаемого слоя почвы. В действительности же его нижняя граница несколько размыта и в течение вегетационного периода может изменяться по глубине. Однако последующее использование принятого приближения показывает его достаточную практическую приемлемость.

Интегрируя (1) по z от $z=0$ (поверхность почвы) до $z=h_k$ (нижняя граница корнеобитаемого слоя почвы), получим:

$$dV/dt = Q(0) - Q(h_k) - E_n(0) + E_n(h_k) - Q_p(0) + Q_p(h_k), \quad (2)$$

Величина $Q_p(h_k)$ по условию, вытекающему из понятия о корнеобитаемом слое почвы, равна нулю. Величина $E_n(h_k)$ в принципе иногда может отличаться от нуля, но даже в таких сравнительно редких случаях она очень мала. Это является следствием двух причин. Первая вытекает из весьма низких скоростей переноса водяного пара в пористых средах. Вторая, более существенная, заключается в том, что поток тепла в почве у нижней границы корнеобитаемого слоя, который в данном случае является практически единственным энергетическим источником парообразования, также весьма мал. Следовательно, в (2) можно принять $E_n(h_k) = 0$.

Вода, поглощаемая корнями растений, далее поступает в стебли (стволы) и листья, где расходуется на транспирацию. Для наземной части растительного покрова также можно написать уравнение водного баланса, аналогичное (1). После его интегрирования по высоте от поверхности почвы до верхней границы растительного покрова получим простое соотношение

$$dV_p/dt=Q_p(0)-E_T, \quad (3)$$

в котором V_p – содержание воды в растительном покрове, отнесенное к единице поверхности почвы; E_T – транспирация.

Производная dV_p/dt играет существенную роль при анализе суточного хода транспирации, но абсолютная величина ее мала, и поэтому в балансовых соотношениях, выходящих за рамки указанной задачи, можно принять $Q_p(0)=E_T$.

Учитывая изложенные соображения, заменим в уравнении (2) $Q_p(0)$ на E_T и перепишем его в виде

$$dV/dt=Q(0)-Q(h_k)-E_{\Pi}-E_T. \quad (4)$$

Если левую и правую части (4) поделить на плотность воды $\rho=1 \text{ г/см}^3$, то все входящие в него величины будут выражаться в единицах слоя воды, деленных на единицу времени. Для исключения величины $Q(0)$ из (4) используем уравнение водного баланса на поверхности почвы:

$$dV_c/dt=H-E_c^*-Q(0)-Y_c \quad (5)$$

в котором V_c – запасы воды в снеге в зимний период или слой воды на поверхности почвы во время выпадения дождей и формирования склонового стока; H – интенсивность дождевых осадков и водоотдачи из снега; E_c^* – испарение снега в зимний период (в период снеготаяния, по имеющимся оценкам [9], испарение снега весьма невелико и им можно пренебречь); Y_c – поверхностный и склоновый сток.

Если рассматривать период, начинающийся с окончания снеготаяния и стока талых вод, и пренебречь величиной dV_c/dt , которая в таком случае отлична от нуля только во время выпадения стокообразующих дождей, то получим простое соотношение

$$H=Q(0)+Y_c. \quad (6)$$

Исключая из (4) и (6) величину $Q(0)$, найдем

$$dV/dt=H-E_c-Q(h_k)-Y_c; E_c=E_{\Pi}+E_T. \quad (7)$$

Здесь E_c – суммарное испарение, смысл которого ясен из приведенного обозначения.

Ресурсы почвенных вод

Почвенные воды обладают двумя особенностями. Первая из них заключается в том, что они играют наиболее активную роль во взаимном обмене вод суши. Так, на формирование поверхностного (склонового) стока расходуется только та часть талых вод или дождевых осадков, которые не впитались в почву. Пополнение запасов грунтовых вод происходит главным образом в тех случаях, когда корнеобитаемый слой почвы в результате впитывания дождевых осадков или талых вод насыщается свыше некоторого значения и образовавшийся излишек сбрасывается за его пределы. В бездождевые периоды при сравнительно неглубоком залегании грунтовых вод ранее сброшенные воды принимают участие в подпитывании корнеобитаемого слоя почвы. Атмосферные осадки и испарение являются составляющими водообмена между почвенными и атмосферными водами.

Вторая особенность почвенных вод заключается в том, что они являются одним из необходимых факторов существования и развития растительного покрова, продукция которого служит первичным звеном трофической цепи наземных экосистем. В этом, в частности, заключается глобальная роль почвенных вод как важнейшего фактора окружающей среды, а также их особая роль в сельскохозяйственном производстве.

Сказанное свидетельствует о том, что почвенные воды являются важнейшим природным ресурсом. Поэтому на данном этапе развития науки и народного хозяйства введение понятия о ресурсах почвенных вод является вполне своевременным.

Любой ресурс должен иметь количественную оценку, а также по крайней мере минимальный набор параметров, дающих представление о возможных масштабах его использования. Рассмотрим подходы к решению этой задачи.

Учитывая первую особенность почвенных вод, обоснование меры, которой должны оцениваться их ресурсы, целесообразно начать с рассмотрения системы балансовых соотношений, характеризующих взаимный обмен вод суши. Ограничимся часто исполь-

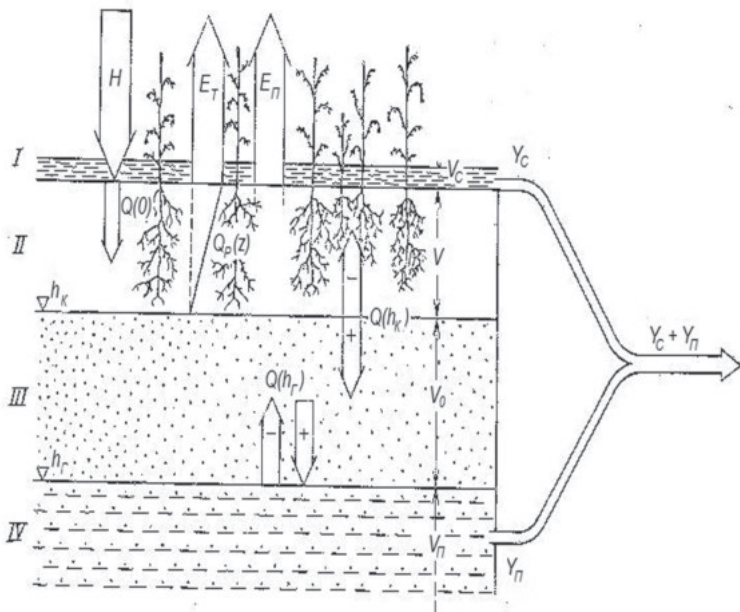


Рис. 1. Схема взаимного обмена вод суши для гипотетического речного бассейна. I – поверхностные воды, II – корнеобитаемый слой почвы, III – зона аэрации, IV – подземные воды

зубомой в гидрологии схемой речного бассейна, в котором поверхностный водораздел совпадает с подземным. Далее осредним все составляющие водного баланса по его площади.

Принятая схема, конечно, не является универсальной. В ней, в частности, не учтена разгрузка подземных вод в окраинные моря, не рассматриваются акватории больших внутренних водоемов и горные районы, в которых имеются ледники. Однако эти частные случаи не имеют принципиального значения для решения рассматриваемой задачи.

Для большей наглядности на рисунке показана упрощенная схема взаимного обмена вод суши применительно к речному бассейну, удовлетворяющему указанным условиям.

При записи уравнения водного баланса зоны аэрации примем, что верхняя граница ее совпадает не с дневной поверхностью, как обычно принято считать, а с нижней границей корнеобитаемого слоя почвы:

$$dV_a/dt = Q(h_k) - Q(h_T). \quad (8)$$

Здесь h_T – глубина залегания грунтовых вод, отсчитываемая от поверхности почвы; V_a – запасы воды в зоне аэрации, между высотами $z=h_k$ и $z=h_T$.

Подземные воды – довольно сложная система, отдельные элементы (горизонты) которой также находятся в состоянии взаимного обмена. Учитывая проведенное осреднение, ограничимся простым соотношением

$$dV_{II}/dt = Q(h_T) - Y_{II} \quad (9)$$

в котором V_{II} – запасы подземных вод, Y_{II} – подземная составляющая речного стока. В ряде случаев, главным образом при проходе паводков, величина Y_{II} может менять знак на обратный, т.е. речные воды частично расходуются на пополнение подземных вод, но при этом в рамках принятой схемы общность записи (9) не нарушается.

Дадим краткие пояснения к некоторым приведенным уравнениям и используемым в последующем терминам.

Величина $Q(0)$ всегда направлена вниз. В литературе на английском языке и во многих отечественных работах ее называют инфильтрацией. Однако этот термин на значительно больших основаниях применяется для передачи существенно иного понятия. Поэтому в дальнейшем будет использован также широко распространенный в отечественных работах и более удобный термин «впитывание воды в почву».

Величина $Q(h_k)$, означающая вертикальный водообмен между корнеобитаемым слоем почвы и зоной аэрации, не имеет общепризнанного термина. Поэтому в целях большей лаконичности назовем ее, когда она направлена вниз, – вертикальным сбросом, а вверх – вертикальным подпитыванием корнеобитаемого слоя почвы.

Поток $Q(h_T)$ также может быть направлен как вниз, к грунтовым водам, так и вверх от них, в зону аэрации. В первом случае эту величину принято называть инфильтрацией, что вполне логично и не вызывает возражений. Восходящий поток от грунтовых вод в зону аэрации в гидрогеологической литературе обычно называют «испарением грунтовых вод», реже «расходом грунтовых вод на испарение». Оба термина, особенно первый из них, крайне неудачны. Выше приводились соображения о том, что испарение воды почвой даже на нижней границе корнеобитаемого слоя можно принять

равным нулю. Поэтому нет никаких оснований говорить об испарении грунтовых вод. Кроме того, утверждение, что при наличии восходящего потока $Q(h_r)$ он в конечном счете полностью расходуется на испарение, равносильно по меньшей мере утверждению, согласно которому величина производной dV_a/dt в (8) всегда равна нулю. Учитывая сказанное, в дальнейшем вместо термина «испарение грунтовых вод» будет использоваться термин «подпитывание зоны аэрации».

Величину E_c входящую в (7), в литературе на английском языке и в некоторых отечественных работах называют эвапотранспирацией. Но, начиная еще с ранних работ М.А. Великанова, в отечественной гидрометеорологии утвердился термин «суммарное испарение», по смыслу полностью совпадающий с указанным выше. В мелиоративной и агрономической литературе до сих пор нередко применяется термин «суммарное водопотребление», полностью совпадающий с термином «суммарное испарение». Однако термин «водопотребление» приобретает все более широкий смысл. Поэтому в данном случае его сохранение неудобно. Кроме того, вполне логичен переход таких прикладных наук, как агрономия и мелиорация, к терминологии, сложившейся в науках геофизического профиля, если они пользуются достижениями последних.

Последовательное исключение из (4) и (5) величины $Q(0)$, а из (8) и (9) $Q(h_k)$ и $Q(h_r)$ приводит к уравнению

$$dV^*/dt = H - E_c - (Y_c + Y_{II}), \quad (10)$$

$$V^* = V_c + V + V_a + V_{II}.$$

В (10) для сокращения записей и большей наглядности опущен член E_c^* равный испарению снега, поскольку эту величину удобно рассматривать в качестве одной из поправок, вводимых в измеренные значения зимних осадков. В (10) в отличие от (5) входит полный объем запасов поверхностных вод в речном бассейне, но, как и ранее, выраженный в величинах их среднего слоя.

Уравнение (10) справедливо для любого не очень большого отрезка времени и может быть проинтегрировано в любых пределах, которые определяются условиями конкретной задачи. В данном случае представляет интерес интегрирование за год, а также последующее осреднение соответствующих годовых сумм. Для

сокращения записей интегралы по времени от всех членов уравнения (10), стоящих в его правой части, отмечены волнистой чертой сверху:

$$V^*(t) - V^*(0) = \tilde{H} - \tilde{E}_c - (\tilde{Y}_c - \tilde{Y}_п). \quad (11)$$

Это – известное уравнение водного баланса речного бассейна, удовлетворяющее указанным выше условиям. Если в пределах рассматриваемого схематизированного бассейна не происходит систематического расходования или пополнения вековых запасов поверхностных и подземных вод, то среднее многолетнее значение разности $V^*(t) - V^*(0)$ будет равно нулю. В результате осреднения (11) получим известное уравнение водного баланса речного бассейна за средний многолетний период:

$$H = E_c + (Y_c + Y_п). \quad (12)$$

Здесь волнистые черты сверху и знаки осреднения опущены.

Следует напомнить, что величина испарения снега E_c^* включена в качестве поправки к зимним осадкам. Следовательно, для районов с устойчивым снежным покровом величины E_c в (11) и (12) соответственно означают годовые суммы испарения и их средние многолетние значения за период от полного схода снежного покрова до его установления, т.е. за период, когда на испарение расходуются только воды, содержащиеся в корнеобитаемом слое почвы.

Величины Y_c и $Y_п$, входящие в (12), в отличие от вековых запасов поверхностных и подземных вод принято использовать для оценки средних многолетних значений возобновляемых водных ресурсов, которые обычно разделяют на ресурсы поверхностных и подземных вод. В силу их довольно сложного взаимного обмена такое разделение часто встречает не только технические, но и принципиальные трудности даже для простейших условий схематизированного бассейна. Тем не менее оно по ряду причин бывает целесообразным и даже необходимым.

Из приведенных балансовых соотношений и их анализа вытекает, что количественной оценкой ресурсов почвенных вод является величина суммарного испарения за указанный отрезок времени. Ресурсы почвенных вод можно разделить на продуктивную составляющую, оцениваемую величиной транспирации, и непродуктивную, оцениваемую величиной испарения воды почвой. Отношение продуктивной составляющей к общей величине ресурсов почвен-

ных вод является удобной характеристикой, показывающей степень полноты использования почвенных вод естественным растительным покровом и сельскохозяйственными культурами.

Стоящую в левой части (12) величину осадков (за вычетом испарения снега) логично рассматривать в качестве ресурсов естественного увлажнения. Согласно этому же уравнению, при принятых условиях они равны возобновляемым ресурсам почвенных, поверхностных и подземных вод.

Учитывая упоминавшуюся вторую особенность почвенных вод, сведений о средней многолетней или даже годовой величине их ресурсов недостаточно. Необходимо дополнительно ввести параметр, который показывал бы, в какой мере они обеспечивают развитие растительного покрова, в особенности посевов сельскохозяйственных культур. Для этого при достаточно генерализованных оценках целесообразно использовать величину отношения фактической транспирации E_T к транспирации, отвечающей оптимальной влажности почвы E_{T_0} . Обозначим это отношение через $\eta_T = E_T/E_{T_0}$.

Величина параметра η_T существенно зависит от характера растительного покрова, определяющегося прежде всего продолжительностью периода его вегетации. Так, в условиях недостаточного увлажнения значения этого параметра для посевов ранних яровых культур, как правило, выше, чем для люцерны или клевера, вегетирующих практически в течение всего теплого периода. Тем не менее смена одной культуры другой может сказаться только на сравнительно несущественном изменении ресурсов почвенных вод за отдельные годы. Средняя же многолетняя величина их останется практически неизменной, если возделываемые культуры не оказывают заметного влияния на пространственное перераспределение снежного покрова, а также на изменение доли талых вод и дождевых осадков, расходуемых на впитывание воды в почву и на склоновый сток.

Параметр η_T является простым и наглядным показателем водообеспеченности растительного покрова. Разность $1 - \eta_T$ может служить показателем засухи.

Второй параметр, характеризующий структуру ресурсов почвенных вод, обозначим через η_p и, согласно высказанным соображениям, представим его в виде $\eta_p = E_T/E_c$.

Третий параметр, дающий наглядное представление о потенциальных возможностях повышения водообеспеченности растительного покрова в условиях естественного увлажнения, обозначим через $\eta_{\text{п}}$. По смыслу он равен отношению ресурсов почвенных вод к величине транспирации при достаточном увлажнении почвы: $\eta_{\text{п}} = E_c / E_{\text{то}}$.

Рассмотренные параметры довольно полно характеризуют ресурсы почвенных вод. Нетрудно заметить, что они связаны между собой простым соотношением $\eta_{\text{т}} = \eta_{\text{р}} \eta_{\text{п}}$.

Ресурсы почвенных вод помимо внутригодовой и межгодовой изменчивости обладают также существенной локальной пространственной изменчивостью. Она проявляется даже на сравнительно малых и внешне однородных участках площадью порядка десятков квадратных метров и возрастает при их увеличении. Причины этого явления заключаются прежде всего в значительной пространственной неоднородности гидрофизических параметров такого специфического водоема, как почва, оказывающих влияние на впитывание, а, следовательно, на локальный сток дождевых и талых вод, что в конечном счете приводит к неравномерному по площади увлажнению почвы. Заметную роль играют даже мелкие локальные факторы, влияющие на пространственное распределение снежного покрова, а также пространственная неравномерность выпадения дождевых осадков.

Факт локальной пространственной изменчивости запасов почвенных вод хорошо известен. Но его принято трактовать как ошибки непосредственных измерений, поскольку они проводятся в ограниченной, обычно четырехкратной повторности. На этом же основании многими авторами ставится вопрос о репрезентативности измерений, проводящихся на гидрометеорологических станциях [8, с. 101]. Но увеличение повторности измерений приводит лишь к уменьшению ошибки средних значений, а сама пространственная изменчивость как явление объективное полностью сохраняется. Поэтому указанную изменчивость запасов почвенных вод и их ресурсов следует описывать с помощью кривых распределения, интерпретация которых очевидна и не требует подробных пояснений.

Пути повышения водообеспеченности растительного покрова

Результаты оценки ресурсов почвенных вод могут дать достаточно полное представление о возможностях и эффективности их использования естественным растительным покровом и сельскохозяйственными культурами; попутно оцениваются их скрытые резервы. Следующая задача заключается в анализе возможных путей улучшения водообеспеченности растительного покрова. В общем случае ее сущность состоит в том, чтобы средняя влажность корнеобитаемого слоя почвы W , соответствующая запасам воды в нем – V и глубине h_k , не выходила за пределы, внутри которых она является оптимальной или приближается к ней.

Существование верхнего предела оптимальной влажности почвы связано с ухудшением аэрации ее корнеобитаемого слоя, в результате чего культурные растения вначале испытывают угнетение, за которым может последовать их гибель. Верхний предел оптимальной влажности существенно размыт, и его величина зависит от вида растений. Можно, однако, утверждать, что для культурных растений она лежит не ниже так называемой наименьшей влагоемкости. Величину нижнего предела оптимального увлажнения часто называют «критической влажностью». Последующее ее убывание приводит к быстрому снижению транспирации и еще более быстрому уменьшению интенсивности фотосинтеза, подавлению продукционного процесса в целом и снижению урожая. Если задача поддержания влажности почвы в оптимальных пределах решается полностью, то улучшение водного режима растений следует считать радикальным. Оно реализуется путем применения водных мелиораций.

При систематическом или периодическом переувлажнении почвы ее осушают. Для снижения запасов воды в почве до значения, обеспечивающего достаточную аэрацию корнеобитаемого слоя, необходимо улучшить условия поверхностного стока, исключающие застаивание воды на поверхности почвы, и в особенности повысить величину вертикального сброса. Последнее возможно при понижении уровня грунтовых вод и улучшении их оттока путем дренирования.

При систематическом или периодическом уменьшении запасов воды в почве, когда ее влажность опускается ниже критической,

радикальный путь улучшения водообеспеченности растительного покрова заключается в организации орошения. По различным оценкам, на эти цели приходится 70–90% всех безвозвратных потерь ресурсов поверхностных и подземных вод в народном хозяйстве. Таким образом, орошение реализуется не за счет улучшения структуры ресурсов почвенных вод, а за счет перестройки сложившихся соотношений между отдельными составляющими ресурсов вод суши.

Площади посевов сельскохозяйственных культур, страдающих от систематических или часто повторяющихся засух, столь велики, что в перспективе едва ли можно оросить более 10–15% из них. Поэтому особое значение приобретают мероприятия по частичному повышению водообеспеченности растительного покрова, прежде всего посевов сельскохозяйственных культур.

Существующие и в принципе возможные пути частичного повышения водообеспеченности посевов можно разделить на четыре группы.

К первой относятся влагозарядковые поливы, задержание снега, а также стока дождевых и талых вод на полях. В данном случае, как и при правильном орошении, повышение водообеспеченности растительного покрова достигается за счет частичного изменения сложившихся соотношений между ресурсами почвенных и поверхностных вод.

Вторая группа основана на снижении испарения воды почвой, которое является непродуктивным, и на соответствующем повышении транспирации, т. е. улучшении структуры ресурсов почвенных вод. Сравнительно небольшое снижение непродуктивного испарения достигается агротехническими приемами, сводящимися главным образом к «закрытию влаги». Однако эффективность их все же довольно невелика. Более радикальный метод заключается в гидрофобизации верхнего слоя почвы или использования гидрофобизированной мульчи, которая обладает очень низкой влагоемкостью и теплопроводностью, а также исключает возможность восходящего передвижения воды в ней.

Третий путь – применение черных паров. Они частично, а иногда и полностью способствуют сохранению весенних запасов воды в почве к моменту посева озимых культур и увеличению их к весне

следующего года. Кроме того, черные пары играют важную роль в борьбе с сорняками. В результате посева не только озимых, но и яровых культур в средние по увлажнению и особенно острозасушливые годы иногда дают в 2–2,5 раза более высокие урожаи по сравнению с посевами по другим предшественникам.

Идея, лежащая в основе приемов четвертой группы, которая довольно полно освещена в литературе, заключается в снижении транспирации путем обработки растений депрессорами испарения или посредством уменьшения скорости ветра лесными полосами. Однако в подобных предложениях упускается из виду, что при высоких температурах воздуха и больших значениях солнечной радиации, характерных для засушливых районов, снижение транспирации должно приводить к перегреву растений, т.е. к одному из опасных следствий засух. Влияние же скорости ветра на транспирацию, в действительности очень незначительное по сравнению с ее влиянием на испарение с поверхности воды или увлажненной почвы, недопустимо преувеличивается. Последнее замечание не подвергает сомнению полезную роль лесных полос в задержании снега на полях и снижении водной и ветровой эрозии почв, а следовательно, и в реализации первого пути повышения водообеспеченности растительного покрова. Что же касается достижения этого снижением транспирации, то данную идею нельзя признать перспективной.

Основные этапы решения задачи частичного повышения водообеспеченности растительного покрова

Обычно оценка эффективности различных приемов частичного повышения водообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур проводится лишь после их полной реализации путем сравнения урожаев с опытных и контрольных участков. На первый взгляд представляется, что такой подход открывает прямой путь к практической реализации тех или иных приемов повышения водообеспеченности посевов и является самым экономным. Однако подробный анализ показывает, что он не обладает указанными достоинствами. Во-первых, из-за трудоемкости, поскольку для исчерпывающей оценки каждого приема необходима достаточно большая повторность опытов, проводимых в различных вариантах, выбор которых основывается на качественных представлениях, а также на

опыте и интуиции исследователя. Во-вторых, при обобщении результатов даже весьма обширных опытов за пределы условий, в которых они проводились, возникают значительные, часто непреодолимые трудности.

К настоящему времени созданы предпосылки преодоления указанных трудностей, позволяющие к тому же значительно быстрее довести наиболее эффективные приемы повышения водообеспеченности посевов до практического внедрения при меньшей затрате сил и средств. Реализация этих предпосылок заключается в поэтапном решении задачи улучшения существующих и разработке новых приемов повышения водообеспеченности посевов.

Первый этап, на котором дается предварительная оценка эффективности различных приемов повышения водообеспеченности растительного покрова, состоит из решения двух тесно связанных задач. Первая заключается в использовании расчетных методов для оценки ожидаемого повышения водообеспеченности при применении различных приемов в разных условиях, характеризующихся конкретным набором параметров, вторая – в оценке повышения биологической продуктивности и хозяйственно ценной части урожая растительного покрова на основе оценки его водообеспеченности. Наиболее перспективный путь решения этой задачи заключается в использовании моделей продукционного процесса. Исследования в этом направлении интенсивно ведутся в Советском Союзе и за рубежом, а полученные результаты начинают применяться для программирования урожая. В качестве паллиатива возможно использование эмпирических зависимостей между урожаем и водообеспеченностью, которые для засушливых районов обладают практически приемлемой точностью. Постановка полевых опытов на первом этапе необходима лишь в объеме, обеспечивающем разработку методов определения некоторых параметров, используемых в расчетах, и для предварительной их оценки.

Второй этап по существу является технологическим и сводится к разработке главным образом агротехнических, а иногда инженерно-технических мероприятий, необходимых для реализации конкретных приемов повышения водообеспеченности посевов. Он обязательно включает постановку полевых опытов. Попутно должно проводиться определение параметров, используемых при расчетах

водообеспеченности растительного покрова и оценки урожая. Результаты сопоставления всех показателей полевых опытов с материалами расчетов, аналогичных проводимым на первом этапе, могут дать исчерпывающие представления о достижимой эффективности поставленных целей. При этом обобщение полученных результатов за пределы условий, в которых проводились опыты, в принципе не может вызвать каких-либо затруднений. Важно также, что при изложенном подходе разработка агротехнических и инженерно-технических мероприятий в принципе может вестись более целенаправленно по сравнению с традиционным подходом.

Третий этап зависит от существа приемов повышения водообеспеченности растительного покрова. В одних случаях он сводится главным образом к организационным мероприятиям, связанным с их внедрением, в других – к разработке новой сельскохозяйственной техники или созданию химикатов, обладающих заданными свойствами, а также их производству.

Рассматриваемая тематика требует достаточно полного раскрытия каждого этапа реализации различных приемов повышения водообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур. Однако в рамках настоящей статьи можно лишь коротко рассмотреть основные положения задачи, сопроводив их короткими примерами.

Решение задачи улучшения существующих и разработки новых приемов повышения водообеспеченности растительного покрова целесообразно начать с оценки ресурсов почвенных вод и характеризующих их параметров. Для этого используется уравнение (7), которое должно быть дополнено соответствующими уравнениями переноса для описания транспирации, испарения воды почвой, водообмена корнеобитаемого слоя почвы с зоной аэрации и склонового стока. К сожалению, даже схематичное рассмотрение всей задачи в рамках настоящей статьи невозможно. Но в степной и большей части лесостепной зоны водообмен корнеобитаемого слоя почвы с зоной аэрации после полного схода снежного покрова и до начала зимы, а также сток дождевых осадков отсутствуют или весьма малы, и ими можно пренебречь. Ограничимся рассмотрением случаев, когда указанные условия выполняются достаточно полно.

Уравнение, описывающее суммарное испарение с разделением его на транспирацию и испарение воды почвой, предложено в [1].

В последующем оно подверглось частичному уточнению [2, 5]. Разработан также вариант, который ценой очень небольших упрощений доведен до вида, наиболее удобного для массовых расчетов [2, 4]. Основы техники расчетов, связанных с оценкой ресурсов почвенных вод и характеризующих их параметров, кратко изложены в [6]. Там же содержится сопоставление материалов расчетов с непосредственными измерениями испарения и запасов воды в почве, результаты которых свидетельствуют о достаточной надежности использованных методов.

В Лаборатории физики почвенных вод Института водных проблем АН СССР проведена предварительная оценка ресурсов почвенных вод и эффективности некоторых приемов повышения водообеспеченности посевов ранних яровых культур для степной и лесостепной зон Европейской части СССР. Техника и результаты их кратко изложены в [6, 7].

Параметр водообеспеченности для этих культур в пределах данного района изменяется от 0,8 до 0,3, а параметр, характеризующий структуру ресурсов почвенных вод, – от 0,4 до 0,3. Значения их свидетельствуют о довольно низкой естественной водообеспеченности посевов в степной и лесостепной зонах и о наличии непродуцируемых ресурсов почвенных вод. Это еще раз подтверждает принципиальную возможность снижения интенсивности и повторяемости засух. Решение этой задачи требует поэтапного подхода, который удобно показать на примере снижения непродуцируемого испарения воды почвой.

Предварительная оценка эффективности рассматриваемого пути повышения водообеспеченности растительного покрова применительно к посевам ранних яровых культур была проведена примерно так же, как и оценка ресурсов почвенных вод, с той разницей, что вместо формулы для расчета испарения воды оголенной почвой была использована модель испарения воды почвой при наличии на ее поверхности слоя мульчи [1, 2]. Значения параметров гидрофобизированного слоя почвы были выбраны с таким условием, чтобы результаты оценки были крайне осторожными. Тем не менее расчеты показали, что параметр водообеспеченности повышается на 70%. Это означает снижение интенсивности и повторяемости засух примерно в 1,7 раза [7].

В настоящее время проводятся полевые исследования, главная цель которых заключается в разработке достаточно простого, но надежного метода определения параметров гидрофобизированного слоя почвы и гидрофобизированной соломенной мульчи. Предварительные результаты подтверждают, что использование значения параметров при упомянутых расчетах повышения водообеспеченности посевов ранних яровых культур, действительно, приводят к очень осторожным оценкам.

Таким образом, созданы предпосылки для перехода к решению второго этапа рассматриваемой задачи. Главное в нем в данном случае заключается в отработке техники гидрофобизации верхнего слоя почвы или мульчи, а также всего комплекса агротехнических приемов, необходимых для выращивания и сбора урожая возделываемых культур. Разумеется, что на этом же этапе необходимо оценить все попутные позитивные и негативные последствия.

Если на втором этапе будет показана высокая экономическая эффективность данного способа повышения водообеспеченности посевов, а, следовательно, урожаев сельскохозяйственных культур, то тем самым обосновывается целесообразность или даже необходимость перехода к третьему этапу решения задачи. Она в основном заключается в создании экономичных гидрофобизаторов, обладающих заданными свойствами (в настоящее время для этих целей используются промышленные отходы), а также в их производстве.

Быстрое возрастание хозяйственной деятельности на обширных участках суши, особенно на сельскохозяйственных полях, часто приводит к изменениям величины и структуры ресурсов почвенных вод. Возникающие изменения водообеспеченности влекут за собой соответствующие изменения наземных экосистем. Не исключено, что еще большую роль будут играть изменения радиационного режима, обусловленные увеличением сжигания топлива и выделения CO_2 , а также других газов, поглощающих длинноволновую радиацию. Вследствие этого возможно глобальное изменение климата, в том числе таких его важнейших параметров, как атмосферные осадки и энергетические факторы испарения. В результате последуют изменения величины и структуры ресурсов вод суши, т.е. соотношения между ресурсами почвенных, поверхностных и подземных вод. Исключительная актуальность оценки этих измене-

ний очевидна. Очевидно также, что в них ведущую роль играют метеорологические параметры, а также параметры, характеризующие состояние деятельной поверхности, включающие характеристики корнеобитаемого слоя почвы и растительного покрова. Но именно они используются для оценки ресурсов почвенных вод. Поэтому развитие подходов к решению задачи, рассмотренной в статье, должно сыграть важную роль в их использовании в оценке возможных изменений ресурсов вод суши в будущем.

Задача оценки эффективности различных приемов частичного повышения водообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур при этом не отпадет, но будет решаться для более сложных условий. Одновременно обобщение изложенных подходов на естественные растительные сообщества позволит дать оценку влияния водного фактора, обусловленного антропогенной деятельностью и в особенности возможными изменениями климата, на наземные экосистемы и на окружающую среду в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги. М.: Наука, 1964. 244 с.
2. Будаговский А.И. Испарение почвенных вод // Физика почвенных вод. М.: Наука, 1981. С. 13–95.
3. Будаговский А.И., Бусарова О.Е., Григорьева Н.И. Методика измерения потоков воды в ненасыщенных средах // Водные ресурсы. №2, 1975, С. 37–49.
4. Будаговский А.И., Джоган Л.Я. Пути последовательного уточнения методики расчета оросительных норм // Водные ресурсы. 1980, б. С. 29–51.
5. Будаговский А.И., Лозинская Е.А. Теория суммарного испарения и ее приложения // Водные ресурсы. №2, 1976. С. 34–55.
6. Будаговский А.И., Шумова Я.А. Методы анализа структуры суммарного испарения и оценки эффективности его регулирования // Водные ресурсы. №6, 1976. С. 83–97.
7. Будаговский А.И., Шумова И.А. Ресурсы почвенных вод и их роль в решении водохозяйственных проблем. – В кн.: Научные основы рационального использования, охраны и управления водными ресурсами. Ч. 1. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 168–175.
8. Вериго С.А., Разумова Л.А. Почвенная влага, Л.: Гидрометеиздат, 1973, 328 с.
9. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1959. 295 с.

Вендров Семён Леонидович

(31.10.1908 – 15.2.1988)



Семён Леонидович Вендров – крупный учёный-гидролог, известный специалист в области водного хозяйства, комплексного использования водных ресурсов, охраны природной среды, доктор географических наук, профессор.

С.Л. Вендров родился 31 октября 1908 г. в г. Вильнюс; до 1920 г. жил на Украине (г. Киев, Белая Церковь); в 1921–46 гг. – в г. Ленинграде. После окончания средней школы в 1925 г. поступил на географический факультет Ленинградского государственного университета (ЛГУ),

который окончил в 1930 г. по специальности гидрология. Ещё в период учёбы на третьем курсе ЛГУ начал работать в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) Главгидрометеослужбы над составлением водного кадастра СССР. Семен Леонидович проработал в ГГИ (в должностях от ст. рабочего до начальника партии и главного специалиста отдела) до 1936 г.

В 1936–60 гг. работал в Гипроводтрансе Наркомвода СССР (затем Минречфлота СССР и РСФСР) в должностях: начальника сектора гидрологии, зам. начальника и начальника отдела изысканий (с 1946 г. – в институте Гипроречтранс, г. Москва). В 1952 г. защитил кандидатскую диссертацию.

В 1960–62 гг. С.Л. Вендров работал в Госкомитете Совета Министров РСФСР по Комплексному использованию и охране водных ресурсов (Госводхоз РСФСР) в должности начальника Управления по учёту и использованию водных ресурсов. В том же году в МГУ им. М.В. Ломоносова защитил диссертацию на соискание учёной

степени доктора географических наук, посвящённую проблемам регулирования режима водохранилищ.

В марте 1962 г. С.Л. Вендров начал трудиться в Институте географии АН СССР (ИГ АН СССР), где возглавил конструктивно-географические исследования гидротехнического строительства в Европейской части СССР и Западной Сибири. В 1968 г. ему было присвоено учёное звание профессора.

Семён Леонидович работал в ИГ АН СССР до 1977 г. в должностях старшего научного сотрудника, научного руководителя и начальника экспедиций. В марте 1977 г. был переведен в Институт водных проблем АН СССР на должность старшего научного сотрудника, с 1986 г. – главного научного сотрудника.

С 1960 г. С.Л. Вендров активно участвовал в работе ГЭК Госплана СССР, ГЭК Госплана РСФСР, в экспертных и других комиссиях Государственного Комитета СССР по науке и технике; работал заместителем Председателя секции научного Совета АН СССР по проблемам биосферы. В 1960–74 гг. член экспертных комиссий ВАК; учёных советов ИВП АН СССР и ИГ АН СССР, докторских специализированных советов ВАК в МГУ им. М.В. Ломоносова и ИГ АН СССР; зам. председателя секции ЕТС научного совета ГКНТ по Комплексному использованию и охране водных ресурсов, член секций НТС Гидропроекта и Союзводпроекта, членом редколлегии журнала «Вопросы географии», член секции гидрологии и секции охраны природы «Гидрометеоздата».

Семён Леонидович внёс неоценимый вклад в развитие отраслей географии, связанных с изучением антропогенных воздействий на водные ресурсы, он стоял у истоков исследований влияния водохранилищ и других гидротехнических объектов на окружающую среду. Значительны его работы по рациональному использованию водных ресурсов.

С.Л. Вендров – один из крупных специалистов по географической экспертизе проектов; он последовательно отстаивал природоохранные позиции: в начале 1960-х гг. был убеждённым противником создания Нижнеобской ГЭС, в 1980-х гг. способствовал прекращению строительства Ржевского гидроузла и др. В последние годы активно участвовал в решении проблем экологизации водохозяй-

ственного баланса Нижней Волги и Нижнего Дона, рационального развития водного хозяйства г. Москвы и Московской области.

Круг научных и практических интересов Семёна Леонидовича чрезвычайно широк. С его именем связаны исследования гидрологического режима и комплексного использования искусственных водных объектов, создание крупных водохозяйственных систем, эксплуатации водохранилищ и проблемы нижних бьефов гидроузлов, прогнозы взаимодействия водоёмов с окружающей средой и вопросы экологии, создание водного кадастра СССР, развитие гидрологической науки.

Он обладал огромным личным опытом и руководил изысканиями для проектирования гидротехнических объектов на многих реках и морских побережьях страны, реконструкцией и строительством речных и морских портов, путевыми работами в оборонных целях (в годы Великой Отечественной войны), а затем восстановительными работами на внутренних водных путях. После войны руководил изысканиями для транспортного освоения водохранилищ на Днепре, Волге и других реках, внедряя новую технику в исследованиях рек и водохранилищ. Семён Леонидович явился инициатором и одним из руководителей нового направления исследований водохранилищ и речных систем в целях отраслевого и комплексного использования водных ресурсов, охраны водных объектов и их взаимодействия с окружающей средой. Он способствовал развитию подобных исследований в ряде научных и университетских коллективов, а также проектной практики, работы высших экспертных советов. С 1984 г. был заместителем научного руководителя работ Института по Комплексной программе Научно-технического прогресса.

Семён Леонидович оставил большое творческое наследие – книги, статьи, публикации в широкой печати. Более 300 его научных работ, посвящённых актуальным проблемам преобразования речных систем и управлению водными ресурсами, широко известны в нашей стране и за рубежом. В числе его наиболее значимых работ можно отметить следующие: О гидрологическом обосновании планов и карт внутренних водных путей сообщения. М.: Речиздат, 1950. 84 с.; Изменение максимального стока равнинных рек в связи с преобразованием природы. М.: Речиздат, 1953. 72 с.; Про-

блемы преобразования речных систем СССР. Л.: Гидрометеоиздат 1970. 236 с.; 2-е изд. 1979, 207 с.; Жизнь наших рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 112 с.

За монографию «Проблемы преобразования речных систем СССР» награждён золотой медалью им. Ф.П. Литке Географического общества СССР.

Семён Леонидович уделял большое внимание педагогической деятельности и работе с аспирантами и соискателями; он имел множество учеников, с которыми щедро делился своими знаниями и опытом. С 1957 г. читал спецкурсы гидрологам, географам, геоморфологам на географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова и в других университетах России. Под его руководством более 30 человек защитили кандидатские диссертации, из них четверо стали докторами наук, известными учёными.

Семён Леонидович отличался большой эрудицией, энциклопедическими знаниями, высоким чувством ответственности, бескомпромиссностью, принципиальностью, мудростью, добротой и благожелательностью, оптимизмом, прекрасным чувством юмора и другими замечательными человеческими качествами.

*И.П. Лебедева (ИВП РАН),
М.И. Степанова (ИВП РАН)*

Ресурсы поверхностных вод и их использование¹

С.Л. Вендров

Водные ресурсы. Как считают многие специалисты, категория «водные ресурсы» отнюдь не синоним суммы природных вод. Это не только природная категория, а в равной мере экономическая и социально-историческая. Ее содержание изменяется в соответствии с уровнем развития человеческого общества. Чем больше потребность в использовании природных вод и чем выше технические и экономические возможности реализации этой потребности, тем больше разновидностей природных вод входит в категорию водных ресурсов, которыми общество может располагать (на данной стадии своего развития) в пределах того или иного крупного региона. Целесообразно дать следующее определение.

Водные ресурсы – пресные и минерализованные, естественные и преобразованные природные воды, которые используются в настоящее время в заданных целях и могут быть использованы в ближайшей и обозримой перспективе.

Водные ресурсы принадлежат к категории неистощимых (возобновляемых) природных ресурсов при соблюдении следующих условий:

- не будут расходоваться вековые запасы поверхностных и подземных вод, ледников и др., за исключением временного их расходования с последующим пополнением;
- загрязнение природных вод в результате хозяйственной деятельности не будет происходить в масштабах, создающих необратимые нежелательные изменения их качества. Кроме того, не должны использоваться водные объекты на территориях заповедников. На остальных территориях использование водных объектов в качестве отраслевых и многоцелевых (комплексных) источников водных ресурсов должно производиться в масштабах и режимах, не вызывающих негативных последствий для состояния окружающей природно-хозяйственной среды.

Непосредственные основные источники водных ресурсов в нашей стране в настоящее время следующие:

- поверхностные пресные воды рек, озер, каналов, водохранилищ;

¹ Вендров С.Л. Ресурсы поверхностных вод и их использование // В сб. «Роль водных ресурсов в жизни страны». М.: Наука, 1987. Стр. 7–21

- подземные пресные воды разных горизонтов, как связанные с реками, так и не связанные с ними.

Дополнительные источники для ограниченного использования – в отдельных районах и в относительно малом количестве, но использование их будет увеличиваться. К ним относятся: 1) минерализованные подземные воды (после опреснения и в естественном виде – в промышленности и сельском хозяйстве); 2) прибрежные морские воды (после опреснения и в естественном виде – в промышленности и в сельском хозяйстве, а также в широких масштабах в водно-рекреационных и бальнеологических целях); 3) термальные подземные воды (как энергоресурсы, промышленное сырье, в бальнеологических целях); 4) вторичные пресные воды (повторное использование после очистки и в водооборотных системах); 5) сточные воды на сельскохозяйственных полях орошения (ЗПО) в сельском хозяйстве; 6) подледниковые воды и ледниковые озера (для непосредственной подачи на коммунальное водоснабжение в городах Средней Азии, Кавказа и Закавказья); 7) в экстремальных условиях, например, в полярных районах, в качестве водных ресурсов используются непосредственно атмосферные осадки и непосредственно лед (покровный и в ледниках). В качестве водных ресурсов следует также рассматривать и почвенные воды.

В будущем одним из важных источников водообеспечения пресной водой в ряде регионов суши могут стать соленые океанические воды, а по мере развития техники доставки воды и льда на дальние расстояния – также и запасы пресных природных вод, находящиеся в твердой фазе (например, из Антарктиды или Гренландии). Очень важны поэтому соответствующие весьма заблаговременные технические, экологические, экономические и правовые исследования, в частности, по проблемам, связанным с международным правом по отношению к различным акваториям и территориям.

По многолетним наблюдениям на метеорологических станциях, слой атмосферных осадков на территории СССР в среднем составляет 531 мм (11 700 км³ в год). Из них 333 мм испаряются, а 198 мм стекают в океаны (открытые моря) и крупные бессточные водоемы (Каспийское и Аральское моря, оз. Балхаш и некоторые другие). Атмосферные осадки распределяются на равнинах СССР по широтно-зональному типу. В пределах европейской части страны наиболь-

шее количество осадков (700–800 мм в год) выпадает между 55° и 60° с.ш.; к северу и югу оно уменьшается и составляет 500–600 мм на севере, 500–450 на юге, до 250 мм на крайнем юго-востоке ЕТС. В Западной Сибири количество осадков составляет 300–600 мм, в Средней, Восточной и Северо-Восточной – 300–400 мм, на Дальнем Востоке благодаря летним муссонам осадков выпадает 500–1000 мм. Наибольшее количество атмосферных осадков выпадает в западных районах Кавказа – до 4000 мм и в горных массивах Тянь-Шаня – более 1000 мм, наименьшее – на равнинах аридных районов Средней Азии – до 150 мм и даже несколько менее.

В стране насчитывается более 2,9 млн рек и ручьев длиной более 0,5 км, в том числе около 150 тыс. рек длиной более 10 км. Рек длиной более 1000 км – 63, более 500 км – 260, длиннее 200 км – 1247. В европейской части СССР реки составляют 22%, в азиатской – 78% от общего числа рек СССР (Вендров, 1986).

В среднем с 1 км² территории страны стекает воды 6,3 л/с, или 197 тыс. м³/год. Среднегодовой сток всех рек СССР составляет 4740 км³/год, из них около 327 км³/год (7,1%) – приток с зарубежных территорий, около 31 км³/год (0,4%) – отток за пределы границ. Сток рек европейской части страны составляет 39% стока всех рек Европы, а азиатской – 42% стока всех рек Азии. По величине среднегодового речного стока СССР находится на втором месте в мире после Бразилии.

Удельный речной сток на единицу площади в СССР меньше, чем в среднем на земном шаре.

Реки СССР относятся к бассейнам трех океанов и Каспийско-Аральскому бессточному бассейну. Бассейн Северного Ледовитого океана составляет 54% всей площади страны, здесь формируется 64% стока; бассейн Тихого океана составляет 14% площади и 20% стока; бассейн Атлантического океана – 8% площади и 6,4% стока; бессточный бассейн составляет 24% площади СССР и 9,6% стока. В табл. 1 показан сток 29 рек страны, имеющих площадь водосбора более 50 тыс. км² (Вендров, 1986).

По степени естественной водообеспеченности территория СССР делится на три зоны.

- Зона высокой (избыточной) водообеспеченности составляет 48% всей территории страны, на которую приходится примерно 75%

Таблица 1

Сток рек СССР с площадью водосбора больше 50 тыс. км²

№ №	Река	Бассейн	Площадь водо- сбора, тыс. км ²	Длина, км	Средний годовой сток*, км ³
1	Обь	Северный Ледовитый океан	2990	3650	404
2	Енисей	То же	2580	3490	630
3	Лена	То же	2490	4400	532
4	Амур	Тихий океан	1855	2820	344
5	Волга	Каспийское море	1360	3350	254
6	Колыма	Северный Ледовитый океан	647	2130	128
7	Днепр	Атлантический океан	504	2200	53,9
8	Дон	То же	422	1870	28,1
9	Хатанга	Северный Ледовитый океан	364	1636	105
10	Индибирка	То же	360	1726	53,6
11	Северная Двина	То же	357	744	109
12	Печора	То же	322	1810	130
13	Амударья	Аральское море	309	1415	69,5
14	Нева	Атлантический океан	281	74	78,5
15	Яна	Северный Ледовитый океан	238	872	30,7
16	Урал	Каспийское море	237	2430	10,1
17	Оленёк	Северный Ледовитый океан	219	2270	34,3
18	Сырдарья	Аральское море	219	2210	37,0
19	Анадырь	Тихий океан	191	1150	64,1
20	Кура	Каспийское море	188	1360	26,8
21	Пясины	Северный Ледовитый океан	182	818	9
22	Таз	То же	150	1400	47,0
23	Неман	Атлантический океан	98,2	937	19,7
24	Западная Двина	То же	88	1020	20,3
25	Мезень	Северный Ледовитый океан	78	966	27,9
26	Днестр	Атлантический океан	72,1	1350	10,7
27	Кубань	То же	58	870	13,5
28	Онега	Северный Ледовитый океан	56,9	416	15,7
29	Камчатка	Тихий океан	55,9	704	33,1

* По данным ГТИ, 1985

всех водных ресурсов. Сюда относятся все северные, северо-восточные и восточные равнинные районы страны, а также горные территории. Можно отметить, однако, что и в этой зоне находят-

ся значительные по площади районы распространения многолетней мерзлоты, где зимой возникает недостаток воды из-за промерзания рек.

- Зона средней водообеспеченности занимает 25% территории; здесь сосредоточено 18% всех водных ресурсов страны. На современном уровне развития экономики водные ресурсы уже и сейчас частично недостаточны для удовлетворения всех заявок на воду, особенно в промышленных центрах, которые нередко располагаются вдали от крупных водных артерий. К ним, например, относятся Центральный экономический район, промышленный Урал, Донбасс и др.
- Зона низкой (недостаточной и остро недостаточной) водообеспеченности составляет 27% территории, и здесь сосредоточено только до 4% водных ресурсов. Сюда относятся юго-восточные районы европейской территории СССР и равнинные территории среднеазиатских республик СССР (Узбекистан, Киргизия, Таджикистан, Туркмения), Казахстан и юг Западной Сибири, часть Забайкалья и центральная Якутия.

На европейскую часть СССР, где проживает более 70% населения, приходится 23% водных ресурсов рек (1060 км³/год без учета стока Дуная).

Континентальный климат (кроме Дальнего Востока, для которого характерны летние муссоны) предопределяет невыгодное (с хозяйственной, но не с природно-экологической позиции) внутригодовое распределение стока, при котором основная масса вод в период половодья (от 60 до 95% годового объема) проходит весной и длится от 2–3 недель до 2,5–3,5 месяца. Между тем в это время существенно меньше, чем в другие сезоны, ощущается необходимость в заборе воды гидроэлектростанциями и на орошение. Отсюда возникает необходимость регулирования стока.

Рельеф как природный фактор часто затрудняет (сдерживает, удорожает) регулирование стока, поскольку создание на равнинах водохранилищ даже в целях сезонного регулирования стока (не говоря уже о многолетнем) связано с большими затратами земель, лесов, иногда с увеличением потерь (в южных районах) воды на испарение, усложнением на затапливаемой площади условий добычи нефти, газа, руды и др.

Определение ущерба хозяйству и природе при создании одноцелевых и комплексных водохранилищ и назначении размеров и форм полной или хотя бы частичной компенсации связаны с уровнем экономического развития региона, с тем или иным уровнем его культуры, с возможностью сочетать долгосрочные планы экономического развития с текущими экономическими задачами; нередко не соответствующими интересам долгосрочного планирования.

По мере интенсификации использования водных ресурсов увеличивается взаимодействие и взаимозависимость смежных территорий и акваторий (а затем не только смежных) при использовании речных вод. Так, существенная часть водных ресурсов страны ограничивается требованиями поддержания необходимых для народного хозяйства водного, солевого, гидробиологического режимов южных морей – в первую очередь Каспийского и Азовского, а в дальнейшем Черного. В будущем эта проблема затронет экономические и экологические проблемы, связанные и с северными морями. Взаимодействие смежных и отдаленных одна от другой территорий при использовании имеющихся ресурсов поверхностных вод определяет сложность научного обоснования сложных водохозяйственных систем. При их планировании следует учитывать заинтересованность как южных, так и северных территорий страны в обеспечении оптимальных природных условий режима и хозяйственного потенциала наших северных и южных окраинных морей, интересы соседних государств.

В СССР на 1 жителя приходится в настоящее время воды около 16 тыс. м³ в год, что в 1,5 раза больше, чем в среднем для земного шара, и намного больше, чем в КНР, Индии, Франции и некоторых странах Восточной Европы. Однако это трансформируется в сложную и часто неблагоприятную картину, если рассматривать территорию страны дифференцированно, по отдельным республикам (табл. 2).

Средний сток на одного жителя во многих наиболее развитых районах страны составляет менее 3 тыс. м³ в год против 16 тыс. м³ в среднем по СССР. Особенно низка обеспеченность собственными водными ресурсами в Туркмении, Молдавии, Узбекистане, Казахстане, Азербайджане и Украине – она равна 0,2–1,5 тыс. м³ в год на душу населения. Меньше водных ресурсов в этих районах прихо-

Таблица 2

**Колебания относительной обеспеченности местным речным стоком
(без притока извне) по отдельным союзным республикам**

Союзная республика или его часть	На 1 км ² площади	На одного жителя
СССР в целом	1,00	1,00
РСФСР в среднем	1,7	1,6
В том числе:		
Поволжье	0,44	0,15
Центральные черноземные области ЕТС	0,50	0,10
Украинская	0,44	0,05
Белорусская	0,88	0,21
Эстонская	1,27	0,44
Латвийская	1,17	0,28
Литовская	1,35	0,29
Молдавская	0,11	0,11
Грузинская	3,81	0,53
Армянская	1,01	0,13
Азербайджанская	0,41	0,07
Узбекская	0,11	0,09
Киргизская	1,24	1,63
Таджикская	1,79	1,00
Туркменская	0,01	0,04
Казахская	1,10	0,24

дится и на единицу сельскохозяйственных угодий, к примеру, в Туркменской ССР – всего лишь 0,03 тыс. м³ против 8 тыс. м³ в целом по стране.

Многие районы зоны недостаточного увлажнения совсем или почти не имеют местного стока, сформировавшегося в пределах этой же зоны, они в основном поступают извне. Так, например, в Туркменской ССР местный сток составляет 1 км³, а приток извне – 67 км³, в Узбекской ССР – соответственно 11 и 106 км³, в Молдавской ССР – 0,8 и 11 км³, при этом некоторая часть водных ресурсов в эти районы поступает из зарубежных стран – Румынии, Афганистана, Ирана, Турции и др.

Взаимодействие гидротехнических систем с окружающей природно-хозяйственной средой. За последние почти 70 лет использование и преобразование отдельных рек и целых речных систем носит комплексный (как минимум 2–3-целевой) характер.

- Строительство крупных гидроэлектростанций: Волховской, Днепровской и Свирской – было одним из первоначальных шагов в длительной работе по электрификации страны и способствовало созданию транзитных глубоководных путей внутреннего водного транспорта.
- Строительство ГЭС, помимо решения чисто энергетических проблем, способствует созданию новых хозяйственных комплексов разных рангов, вплоть до крупнейших территориально-производственных в восточных, ранее мало освоенных районах страны. Оно послужило базой для аграрного и аграрно-промышленного развития традиционных (Средняя Азия, Закавказье) и новых (юг Украины, юго-восток европейской части РСФСР) районов орошаемого земледелия. Наконец, строительство отдельных крупных гидроузлов и каскадов ГЭС наряду с урбанизацией способствовало электрификации сельского хозяйства.
- Построенный в середине 30-х годов канал Москва-Волга разрешил проблему водоснабжения многомиллионного города и сделал возможным долгосрочное развитие в Подмосковье водных рекреаций, водного туризма. Одновременно открылось сообщение водным путем с другими речными бассейнами, а впоследствии и морями – Черным, Азовским, Каспийским, Балтийским, Белым.
- Строительство каналов в сочетании со строительством ГЭС и каскадов ГЭС обусловило создание единой глубоководной системы внутреннего водного транспорта ЕТС. Велико значение каналов для многих видов хозяйственной деятельности человека (табл. 3). В настоящее время все больше развиваются смешанные транзитные перевозки «река–море», в том числе и совместно с зарубежными странами.

Общее представление о масштабах преобразований речных систем к началу 80-х годов столетия можно получить из сопоставления площади их водоемов:

Водоем	тыс. км ²
Естественный	
Внутренние моря	520
Озера, пресные и соленые	490
Реки	160
Ледники (горные) и острова Арктики	75

Водоем	тыс. км ²
Всего	1250
Искусственный	
Водохранилища существующие	135
строящиеся, в том числе затопленная суша	80
Каналы существующие и строящиеся	8

Следующие соотношения вырисовываются при сопоставлении объемов водохранилищ с объемом речного стока:

1	Средний многолетний сток, формирующийся в пределах СССР	4360
2	Летне-осенне-зимняя межень	1200
3	Общий естественный гарантированный сток (меженный минимальный, половодье и паводки)	1800
4	Полезный объем существующих и строящихся водохранилищ	490
5	Вода, забираемая: для транспортировки стока головными водозаборами основных каналов страны	100

Сопоставляя полезный объем существующих и строящихся водохранилищ со стоком в весенне-летне-осеннюю межень и с общим объемом естественного гарантированного стока, можно сказать, что к настоящему времени меженный сток увеличился примерно на 40%, а гарантированный – на 30% и будет увеличиваться в дальнейшем.

Полная емкость существующих в СССР водохранилищ составляет около 20% полезной емкости всех водохранилищ мира, а общее число искусственных водохранилищ и прудов в настоящее время в СССР составляет около 130 тыс., или около 15% всех искусственных водоемов мира (Водохранилища, 1986).

Роль малых прудов в местных хозяйствах в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения велика и сейчас, но должна быть существенно увеличена, особенно для сельскохозяйственного водоснабжения, «малой» ирригации, организации животноводческих и других предприятий современного агропромышленного комплекса.

Нельзя недооценивать роль сельскохозяйственных и промышленных прудов в преобразовании естественного местного стока малых рек. Она выражается в изменении внутригодового распределения стока – в задержке паводков и создании более равномерного водного питания в летне-осеннюю межень. Пруды в сочетании с лесополосами, укреплением оврагов и другими противоэрозион-

Таблица 3

Краткие сведения об основных каналах СССР

№	Год ввода в эксплуатацию	Канал или гидротехническая система	Длина, км	Пропускная способность в головке канала, м ³ /с	Объем переброски, км ² /год (округленно)	Источник забора воды	Основное назначение
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1933	Вахшский канал	27,3		6,7	р. Вахш (бас. р. Амударья)	Преимущественно орошение
2	1937	Канал им. Москвы	128	95	2,3	р. Волга (Иваньковское водохранилище)	Водоснабжение г. Москвы, водный транспорт, рекреация, обводнение Подмоскovieвья, выработка энергии (ГАЭС на гидроузлах). Входит в Единую глубоководную систему основных судоходных путей ЕТС
3	1939	Большой Ферганский канал им. У. Юсупова	270	100	6,6	р. Сырдарья	Преимущественно орошение
4	1940	Северный Ферганский канал	132	115	3,5	р. Сырдарья	Преимущественно орошение
5	1940	Южный Ферганский канал	93	60	2,1	р. Сырдарья	Преимущественно орошение
6	1940	Канал им. Ленина	97	140	4,2	р. Амударья	Преимущественно орошение
7	1940	Канал Совет-Яб	62	70	2,1	р. Амударья	Преимущественно орошение

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8
8	1946 (1709)	Вышеволоцкая система	18	32	0,9	Бассейн р. Мсты	Питание Верхней Волги (последняя реконструкция самого старого в России водотранспортного соединения через водораздел)
9	1948	Невинномысский канал (Кубань-Егорлыкско-Маньчская система)	49	75	1,3	р. Кубань	Преимущественно орошение, обводнение, частично водоснабжение
10	1952	Волго-Донской судоходный канал им. В.И. Ленина	101	100	0,6	р. Дон, Цимлянское водохранилище	Водный транспорт, орошение и рекреация, входит в Единую глубоководную систему основных судоходных путей ЕС
11	1957	Большой Ставропольский канал	159		0,3–5,7	Бассейны рек Кубани и Дона	Орошение, обводнение, водоснабжение ¹
12	1957	Канал Северский Донец – Донбасс	129	25	0,7	р. Северский Донец	Водоснабжение центрального и западного Донбасса, местное пригородное орошение
13	1958	Донской магистральный канал	112		1,0	р. Дон, Цимлянское водохранилище	Орошение, обводнение
14	1956–1968	Северо-Крымский канал (очередьями)	403	215	5,5	Водоохранилища на р. Днепр	Преимущественно орошение, обводнение, водоснабжение
15	1960	Южный Голодностепский канал	126	245	9,5	р. Сырдарья	Орошение

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8
16	1961	Верхнеширвакский канал	123		2,4	Басейн р. Куры	Орошение
17	1961	Терско-Кумский канал-Терско-Кумская оросительная система (очередьями)	150	100	0,3-1,0	р. Терек	Преимущественно орошение, обводнение
18	1961	Канал Днепр-Кривой Рог	42	41	1,3	Водоохранилища на р. Днепр	Преимущественно орошение, водоснабжение Криворожского промышленного района и некоторых городов Украины, местное орошение
19	1962	Кубань-Калаусская оросительно-обводнительная система	159	220	0,3-1,6	р. Кубань (Усть-Джегутинское водохранилище)	Преимущественно орошение, обводнение
20	1966	Шарабадинский магистральный канал	27		35	Басейн р. Куры	Преимущественно орошение
21	1966	Каракумский канал им. В.И. Ленина (очередьями)	1100	198	13,0	р. Амударья	Преимущественно орошение, судоходство до г. Ашхабада — 800 км
22	1966	Канал Волга — Уволь	78		0,1-0,2	р. Волга	Водоснабжение г. Иваново
23	1966	Волго-Балтийский водный путь	361		1,2	р. Шексна	Водный транспорт. Входит в Единую глубоководную систему основных судоходных путей ЕТС

24	1970	Большой Андijanский канал	109	200	10,4	р. Сырдарья	Орошение
25	1970	Каховский магистральный канал	125		11,7	р. Днепр, Каховское водохранилище	Орошение
26		Канал Иртыш-Караганда	458	75	2,4	Р. Иртыш	Преимущественно орошение, водоснабжение
27		Каршинский магистральный канал	165	170	5,5	р. Амударья	Орошение
28		Амубухарский канал	234	80	3,5	р. Амударья	Орошение
29		Канал Вилия (Нерис)-Свислочь	30	40	0,3-0,4	р. Вилия (Нерис)-бассейн р. Немана	Водоснабжение г. Минска, обводнение его пригородной зоны, рекреация
30		Вазузская гидротехническая система	190	35	0,6-0,8	р. Вазуза, приток р. Волги	Водоснабжение западных районов г. Москвы
31		Канал Днепр-Донбасс; строительство очередями	213 (465)	120	1,3 (4,0)	р. Днепр, Днепродзержинское водохранилище	Водоснабжение городов Донбасса и г. Таганрога, местное (пригородное) орошение в Донбассе, подпитка р. Северский Донец
32		Чилик-Алма-Ата	171		2,7	р. Чилик	Орошение
33		Кизиктен, подпитывающий канал	26		4,3	р. Амударья	Орошение
34		Туннель Арпа-Севан	40		0,25	р. Арпа, бассейн р. Кура	Орошение

ными мероприятиями существенно меняют местные природные условия, преимущественно в благоприятную сторону². Однако пруды не служат основными регулирующими емкостями в речной сети страны.

В СССР к концу 80-х годов эксплуатировалось более 2500 водохранилищ. Половина этих водохранилищ, в том числе самые крупные, созданы при гидроэлектростанциях; на их долю приходится 95% площади водного зеркала, 97 и 96% полного и полезного объема.

Ранее уже указывалось на необходимость очень осторожного подхода к созданию новых крупных водохранилищ на равнинах, чтобы свести к минимуму затраты земли на сельскохозяйственные цели. Сравним удельную площадь зеркала в районах с разными условиями рельефа в расчете на 1 кВт установленной мощности ГЭС (табл. 4).

Таблица 4

Удельное затопление площади на единицу мощности ГЭС

Водоохранилище	Тип водохранилища	Река	Установленная мощность, тыс. кВт	Затопленная площадь, км ²
Нурекское	Высокогорное	Вахш	2700	0,05
Мингечаурское	Предгорное	Кура	659	1,7
Куйбышевское	Равнинное	Волга	2300	2,7
Каховское	Равнинное	Днепр	312	7,0
Цимлянское	Равнинное	Дон	165	16,4

При сооружении водохранилищ на равнинных реках затраты земли увеличиваются в тех случаях, когда плотины возводятся ниже слияния рек. Показательны в этом отношении сравнительные потери земли в удельном исчислении для разных водохранилищ Волги и Камы. При сооружении на Верхней Волге Ивановской, Угличской, Рыбинской и Горьковской ГЭС «расход» земли на 1 м напора составил 30 и 20 км² на Ивановской и Угличской, а на Рыбинском – 240 км²; плотина здесь расположена ниже слияния трех рек – Волги, Мологи и Шексны. На Горьковском водохранилище было занято 100 км² площади. Для водохранилищ на Средней и Нижней

² Мы говорим «преимущественно», т. к. запущенные, плохо эксплуатируемые, а тем более заброшенные пруды, с неисправными плотинами и водосливами, заиленные, заросшие, загрязненные, отрицательно влияют на природные и хозяйственные условия прилегающей местности и на режим всей гидрографической системы

Волге (Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского) израсходовано земли на 1 м напора соответственно 235, 140 и 145 км², разница в площадях связана с тем, что при сооружении Волжской ГЭС им. В. И. Ленина водохранилище заняло не только долину Волги, но и долину Камы в ее низовьях.

Исследования взаимодействия крупных водохранилищ с окружающей средой входят в общий круг вопросов рационального природопользования и охраны природных ресурсов, оптимизации природной среды в целом.

В настоящее время изучение различных сторон взаимодействия водохранилищ и среды является предметом внимания специалистов различных отраслей науки.

При проектировании крупных водохозяйственных систем и отдельных гидроузлов особое внимание уделяется прогнозированию взаимодействий в системе «гидротехнический и водохозяйственный комплекс – окружающая среда» и разработке соответствующих рекомендаций.

Все более необходим в этих проектах научно обоснованный прогноз долговременных последствий взаимовлияния крупных водохозяйственных систем и окружающей среды; для значительных проектов этот вопрос рассматривается как задача не только местная, но и крупно региональная.

Более объективная оценка площади, подлежащей затоплению с расположенными на ней различными строениями, дорогами, линиями электропередач, линиями связи, а также лесными, пахотными угодьями, полезными ископаемыми, повышает компенсационные затраты и стоимость переноса сооружений. Кроме того, повышаются требования к сооружениям берегозащиты, предотвращению подтопления, заболачивания и просадок грунта на прилегающих территориях; необходимы меры, способствующие устранению неблагоприятных воздействий на гидрогеологический режим и препятствующие водной и ветровой эрозии.

В последние годы в районах затопления значительно усилены требования к полному использованию различных природных ресурсов на площади, подлежащей затоплению. Так, например, с пойм и надпойменных террас следует снять плодородный почвенный слой и вывезти его для использования в садах и парках в горо-

дах, пригородных хозяйствах и на сельскохозяйственных полях, прилегающих к вновь создаваемому водохранилищу. В будущем, по-видимому, шире будет применяться очистка от леса в полосе ожидаемой деформации новых берегов, что особо важно в зоне периодической осушки в пределах сливной призмы водохранилища, чтобы попеременное пребывание леса в воздушной и водной среде не ускорило его гниение и не способствовало бы ухудшению качества воды в водохранилище.

Следствие нового подхода – продуманный подход к выбору отметки нормального подпорного уровня водохранилища, от этого будут зависеть размеры площади затопления и другие основные параметры водохранилища. Отсюда вытекают основные требования к эксплуатационному режиму регулирования, динамике уровня воды, времени и длительности допустимой его форсировки и максимальной сработки, интенсивности и амплитуды колебаний уровня воды в разные сезоны года, особенно зимой.

Следствием усиления внимания к проблемам сохранения естественных ресурсов и охраны биосферы в целом является новый подход к назначению сбросных расходов их водохранилищ в нижние бьефы, особенно в устьевые зоны рек. Это относится к постоянным попускам, как базовым, в большинстве своем санитарным, так в еще большей степени к специальным. Здесь, прежде всего, нужно назвать искусственные половодья, преследующие сельскохозяйственные, рыбохозяйственные, общие экологические, общегигиенические, транспортные цели, а также способствующие смыву различных естественных и антропогенных отходов, накапливающихся в руслах и долинах, лишенных периодического промыва естественной «большой водой».

При организации попусков на юге важно учесть, прежде всего, интересы рыбного хозяйства, в том числе и экологические условия для стада проходных и полупроходных рыб. Важно, в частности, не усугублять возможности возникновения заморных явлений зимой, связанных с недостатком кислорода в толще водной массы. Они, как известно, тем вероятнее, чем толще ледяной покров в сочетании с недостаточным количеством воды, находящейся в статическом состоянии в омутах русла и малоактивных старицах поймы и дельты.

Размеры и режим сбросных расходов в разные сезоны года могут существенно влиять и на русловой режим устьевых зон рек, на состояние устьевого бара, следовательно, на навигационные условия и на объем и режим будущих дноуглубительных работ. Поверхностные течения относительно более пресной речной воды над слоями более плотной водной массы морского происхождения в приустьевом взморье могут измениться в неблагоприятном для биологии береговых зон моря направлении, если в зимнее время пресный сток в море будет снижен без учета местных особенностей и объективных требований.

Особенностям сезонного режима сбросов в нижние бьефы в последние годы уделяется больше внимания, в том числе и для зимнего времени. Уместно, однако, подчеркнуть, что позиция «никаких ущербов природе» при использовании водных ресурсов и преобразовании речной сети хотя и крайне желательна, но в крайнем своем выражении не может быть выдержана. Любая техническая, природная, природно-техническая система не может работать в заданном направлении без заимствования какого-то количества энергии и ресурсов внешней среды.

Оптимизация использования окружающей среды, использования и охраны всех или многих ее ресурсов при осуществлении крупных водохозяйственных проектов возможна только при комплексном решении и существенных затратах на заблаговременную подготовку и реконструкцию хозяйства всех водопотребителей. Необходимо сочетание принципов отраслевого и территориального планирования с детальным учетом потенциальных эксплуатируемых местных ресурсов и природных особенностей.

Особо нужно сказать о строящемся Крапивинском водохранилище на р. Томи. Это первое в СССР крупное водохранилище, которое сооружается специально для охраны природной среды Кемеровской области. Его назначение – разбавление меженного расхода р. Томи, перегруженного сточными водами, свежей водой, накопленной в период весеннего стока в горных районах бассейна. Мера эта предусматривается наряду с усилением глубокой очистки сточных вод до их выпуска в реку, что будет способствовать сохранению элементов естественных процессов в реке, улучшению качества воды. В данном случае имеются в виду процессы самоочищения в водном потоке.

В последнее время в практике проектирования и эксплуатации водохранилищ усиливается понимание задач комплексного использования водных ресурсов, их экономическая эффективность, сохранение экологического благополучия в водных объектах и их окружении.

При рациональном природопользовании и охране окружающей природной среды, в том числе и внутриводоемной, мелководья водохранилищ играют важную роль, как места для нереста и нагула многих видов рыб; как площадь, на которой после сработки уровня воды и осушки части дна происходит естественное возобновление кормовой базы растительноядных рыб; фильтр, задерживающий и очищающий от продуктов эрозии и загрязняющих веществ, поступающих с водосбора через прилегающую к водохранилищу береговую полосу, и т.д. Однако мелководья равнинных водохранилищ в то же время источник повышенных непродуктивных потерь воды на испарение, один из очагов развития и скопления фитопланктона, в частности синезеленых водорослей. При рассмотрении каждого проекта создания нового или реконструкции старого водохранилища вопросы использования мелководий обычно служат предметом особого внимания.

Весьма нежелательны водохранилища в устьевых областях равнинных рек. Они существенно меняют естественные двусторонние связи реки с морем.

Водоохранилища в низовьях равных рек изменяют природные условия дельты (эстуария) в невыгодную для ее хозяйственного использования сторону. Резкое в этом случае ухудшение дренирования в низовьях реки тем более нежелательно в тех случаях, когда дренирование недостаточно и в естественном режиме.

Развивающееся в СССР внимание к задачам периодического промыва и обводнения искусственными попусками русел и пойм рек в нижних бьефах в санитарных, сельскохозяйственных, рыбохозяйственных целях, отказ от сооружения некоторых водохранилищ в низовьях равнинных рек, осторожный подход к созданию крупных водохранилищ на равнинных реках – все это представляется нам важными современными мерами, разумно ограничивающими пределы нагрузок на природу рек в интересах оптимизации среды оби-

тания, а, следовательно, в долговременных интересах экономического и социального развития.

При дальнейшем развитии регулирования стока, по-видимому, внимание будет уделено созданию не крупных, а средних и малых водохранилищ. Они должны помочь осуществлению задачи, которая в последние годы рассматривается как очень актуальная, связанная с требованием резко улучшить рациональное использование местных природных ресурсов. Это задача возможно более полного использования местного стока, включая часть транзитного, в сочетании с охраной и улучшением природных условий речных долин и русел малых рек.

Говоря об охране речных долин и русел малых рек, уместно заметить, что в настоящее время нуждаются в охране и русла многих судоходных рек. Размеры и места добычи песка и гравия (а почти все речные пароходства очень резко увеличивают объемы их добычи и перевозок) в настоящее время с позиций охраны природы не регламентируются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Буторин Н.В., Вендров С.Л. Влияние водохранилищ на окружающую среду // Преобразование водного баланса под влиянием хозяйственной деятельности. Материалы XXIII Междунар. геогр. конгр. Л.: Гидрометеиздат. 1975. С. 6–17.
2. Авакян А.Б. Водоохранилища и окружающая среда. Науки о земле. №1. М.: Знание. 1982. 44 с.
3. Бабкин В.И., Будыко М.И., Соколов А.А. Водные ресурсы и водообеспеченность СССР в настоящем и будущем // Генерал. докл. V Всесоюз. гидрол. съезда. Л.: Гидрометеиздат. 1986. С. 84–118.
4. Вендров С.Л. О некоторых задачах географических наук в связи с проблемой водохозяйственного благоустройства // Вопросы географии. Перспективы географии. Сб. 100. М.: Мысль. 1976. С. 185–192.
5. Вендров С.Л. Несколько соображений по проблеме «вода и природопользование» // Вопросы географии. Природопользование. Сб. 105. Геогр. аспекты. М.: Мысль. 1978. С. 112–119.
6. Вендров С.Л. Проблемы преобразования речных систем СССР. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат. 1979. 207 с.
7. Вендров С.Л. К вопросу об исследованиях взаимодействия крупных гидроузлов и водохозяйственных систем с окружающей средой. // Сб. науч. тр. Гидропроекта. М. 1979. С. 5–14.
8. Вендров С.Л. Рациональное использование водных ресурсов Европейского Севера СССР и охрана окружающей среды // Водные ресурсы. 1984. Т. 4. С. 3–11.

9. Вендров С.Л. Некоторые современные задачи научного обоснования проектов крупных водных (водохозяйственных) систем. Тез. докл. V Всесоюз. гидрол. съезда. Секция гидрол. обоснования водохозяйств. мероприятий. Л.: Гидрометеиздат. 1986. С. 49-51.

10. Вендров С.Л. Жизнь наших рек. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 112 с.

11. Вендров С.Л., Дьяконов К.Н. Водохранилища и окружающая природная среда. М.: Наука. 1976. 136 с.

12. Водохранилища мира. М.: Наука. 1979. 287 с.

13. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука. 1986. 367 с.

14. Воропаев Г.В. Единая водохозяйственная система страны // Водные ресурсы. 1976. №6. С. 98–109.

15. Воропаев Г.В. Управление водными ресурсами суши и окружающая среда // Вестник АН СССР. 1979. №24. С. 59–69.

16. Воропаев Г.В. Проблема управления ресурсами вод суши // Теория и методы управления ресурсами вод суши. М.: Наука. 1982. С. 6–18.

17. Воропаев Г.В. Водные проблемы СССР // Генерал. докл. V Всесоюз. гидрол. съезда. Л.: Гидрометеиздат. 1986. С. 119–151.

18. Гладков Н.А. Охрана природы в первые годы Советской власти. М.: Изд-во МГУ, 1972. 35 с.

19. Зарубаев Н.В. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Л.: Стройиздат. 1976. 224 с.

20. Израэль Ю.А., Черкаский С.К., Шикломанов И.А. Основные итоги и перспективы развития гидрологии в свете решений XXV съезда КПСС // Генерал. докл. V Всесоюз. гидрол. съезда. Л.: Гидрометеиздат. 1986. С. 3–59.

21. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеиздат. 1968. 237 с.

22. Крицкий С.Н., Менкель М.С. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука. 1981. 255 с.

23. Мировой водный баланс и водные ресурсы земли. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 608 с.

24. Овсянников Н.Г. Водные ресурсы СССР, их использование и охрана. Томск: Изд-во Томск. ун-та. 1980. 237 с.

25. Раткович Д.Я. Многолетние колебания годового стока. Л.: Гидрометеиздат. 1976. 254 с.

26. Рябышев М.Г. Охрана водных ресурсов Москвы // Водные ресурсы. 1975. Т. 5. С. 15–32.

27. Шикломанов И.А. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. Л.: Гидрометеиздат. 1976. 77 с.

Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеиздат. 1979. 302 с.

Вознесенский Андрей Николаевич

(7.8.1903 – 28.10.1974)



Андрей Николаевич Вознесенский – выдающийся учёный-гидротехник, специалист в области комплексного использования водных ресурсов; талантливый руководитель и организатор, доктор технических наук, профессор, директор института Гидропроект им. С.Я. Жука, первый директор Института водных проблем АН СССР (1967–73 гг.).

А.Н. Вознесенский родился 7 августа 1903 г. в г. Ковель Украинской ССР. Среднее образование получил в г. Киржач Владимирской области, учился с перерывами. В 1919–20 гг. находился на комсомольской и партийной работе, в 1921 г. участвовал добровольцем в подавлении Крондштатского мятежа. В 1923 г. Андрей Николаевич приступил к занятиям в Ленинградском политехническом Институте, который окончил в 1930 г. по специальности инженер-гидротехник.

По окончании института А.Н. Вознесенский поступил на работу в Ленинградское отделение Энергостроя и был командирован в Среднюю Азию, где ему поручили организацию Среднеазиатского отделения Гидроэнергостроя. В 1931 г. А.Н. Вознесенский был переведён в Гидроэнергопроект (г. Москва), где работал старшим инженером, руководителем проекта, начальником экспедиции в Дагестане, Хакасии, Сибири, зам. главного инженера Куйбышевского гидроузла; управляющим Гидроэнергопроектом и директором Института Гидроэнергопроект.

В 1941–59 гг. А.Н. Вознесенский возглавлял институт Гидропроект, который под его руководством стал крупнейшим центром по

исследованиям и проектированию гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий.

В течение длительного периода (1937–60 гг.) как главный редактор руководил редколлекцией научно-технического журнала «Гидротехническое строительство».

В 1959 г. А.Н. Вознесенский был назначен заместителем председателя Совета по изучению производительных сил СССР и непосредственно руководил решением комплексных проблем водного хозяйства, энергетики и отдельных народнохозяйственных комплексов.

В ноябре 1967 г. Правительство СССР рассмотрело вопрос о состоянии водных проблем в стране и приняло постановление о создании в системе Академии наук СССР Института водных проблем (ИВП АН СССР). Андрей Николаевич стал его первым директором и фактическим организатором, вложил много сил и энергии в становление и развитие Института.

А.Н. Вознесенский провёл огромную работу по обоснованию основных научных направлений деятельности Института, привлечению известных специалистов страны в области водных проблем, комплектованию Института высококвалифицированными кадрами, развертыванию научных исследований. С его именем связано становление Института как одного из ведущих научных коллективов страны.

На протяжении почти полувека его разносторонняя инженерная, организационная и научная деятельность была целиком посвящена проблемам изучения и комплексного использования водных ресурсов России; развитию гидроэнергетики; научному и народнохозяйственному обоснованию путей решения важнейших водохозяйственных проблем страны, правовым основам водопользования. Это далеко не полный перечень вопросов, решению которых Андрей Николаевич отдавал всю свою энергию, блестящий организаторский талант, убежденность учёного.

А.Н. Вознесенским опубликовано более 60 научных работ. Им разработана методика изучения и всесторонней оценки гидроэнергетических ресурсов, хорошо известная в нашей стране и за её пределами. Под его редакцией, научным руководством и при непосредственном участии подготовлены и вышли в свет фундаментальные

научные труды: «Гидроэнергетические ресурсы мира и основные показатели оборудования зарубежных ГЭС», «Топливо-энергетические ресурсы СССР», «Гидроэнергетические ресурсы СССР», «Гидроэнергетика СССР». В указанных работах обоснованы теоретические и научно-методические положения по созданию крупнейших современных и перспективных водохозяйственных комплексов и учёту водного фактора при развитии и размещении производительных сил. А.Н. Вознесенский принимал активное участие в разработке методических основ составления Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР.

Теоретические и научно-методические результаты, полученные А.Н. Вознесенским, нашли широкое практическое применение. Под его руководством и при непосредственном участии были проведены крупные работы по составлению схем использования важнейших рек (Волги, Камы, Ангары, Енисея, Оби, Сырдарьи, Немана и Западной Двины, рек Кавказа и Кольского полуострова и др.), проектированию крупных гидроэлектростанций (Иркутской, Братской, Красноярской, Пермской, Горьковской и др.), разработке научно обоснованных направлений и планов развития водного хозяйства; Андрей Николаевич участвовал в строительстве Братской и Ингурской гидроэлектростанций.

За успешное выполнение правительственных заданий, большой вклад в развитие гидроэнергетики и отечественной науки А.Н. Вознесенский был удостоен почётного звания «Заслуженный деятель науки и техники Узбекской ССР», награждён двумя орденами Ленина, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденами Красной Звезды, Знак Почёта и несколькими медалями.

*А.Н. Гельфан (ИВП РАН)
М.И. Степанова (ИВП РАН)*

Воропаев Григорий Васильевич

(12.2.1932 – 9.9.1999)

Григорий Васильевич Воропаев – выдающийся учёный и организатор науки, внёсший существенный вклад в развитие теории формирования водных ресурсов суши, рационального водопользования, управления водохозяйственными системами; доктор технических наук, профессор, член корреспондент АН СССР, директор Института водных проблем АН СССР в 1976–88 гг.



Г.В. Воропаев родился 12 февраля 1932 г. в г. Ленинск Кемеровской области. В 1950 г. поступил в Московский институт инженеров водного хозяйства (МИИВХ), который окончил с отличием в 1955 г. по специальности инженер-гидротехник и был оставлен в аспирантуре. В период учёбы в аспирантуре и после её окончания вёл большую научную и преподавательскую работу. В 1955–59 г. – младший научный сотрудник научно-исследовательского бюро МИИВХ, принимал участие в Таджикской научной экспедиции; в 1959 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Технико-экономическое обоснование водохозяйственных мероприятий». В 1959–71 гг. работал в Казахском НИИ водного хозяйства Минводхоза СССР (КазНИИВХ): в 1959–62 гг. старший научный сотрудник, с 1962–66 гг. зав. отделом эксплуатации оросительных систем, с 1966–71 гг. зав. отделом экономики водного хозяйства и лабораторией экономико-математических методов и вычислительной техники КазНИИВХ. В 1965 г. в журнале «Экономика сельского хозяйства» была опубликована статья Г.В. Воропаева «За воду надо платить», совсем нетипичная для того времени. На основе опыта исследований в аридной зоне им были научно обоснованы принципы комплексной реконструкции ирригации как важнейшего средс-

тва повышения эффективности использования водно-земельных ресурсов и коренного улучшения среды обитания человека.

Все дальнейшие годы жизни Г.В. Воропаева были отданы Институту водных проблем АН СССР (ИВП АН СССР, с 1991 г. – ИВП РАН). В 1971 г. Григорий Васильевич был избран зав. сектором водных мелиораций и водообеспечения, в 1975 г. – зав. отделом научных основ управления водными ресурсами, в 1976 г. – директором Института.

В 1972 г. он защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук, в том же году ему было присвоено учёное звание профессора; в 1976 г. избран членом-корреспондентом АН СССР.

Г.В. Воропаев был бесконечно предан науке, с его именем связано развитие целого ряда направлений в области управления водными ресурсами суши как важнейшим компонентом биосферы. Рассматривая все воды суши в их взаимосвязи с другими компонентами природной среды и как объект хозяйственной деятельности, он обосновал идею управления ресурсами и режимом вод суши как элемент общей стратегии рационального природопользования. Разработал физико-географические основы водохозяйственных балансов; комплекс мероприятий по совершенствованию оросительных систем и повышению эффективности использования водных и земельных ресурсов. Им была предложена стратегия развития водного хозяйства крупных регионов на отдалённую перспективу с учётом экономико-географических аспектов водохозяйственного районирования страны, выдвинута идея создания единой водохозяйственной системы страны, выполнено моделирование крупных водохозяйственных систем. Предложены новые подходы к управлению водами суши с учётом экономико-географических аспектов водохозяйственного районирования страны, прогнозов развития водного режима крупного географического региона на отдалённую перспективу, улучшения экологического состояния территории.

Г.В. Воропаевым были установлены физико-географические закономерности формирования водопотребления, что позволило поновому подойти к разработке проблемы водоустройства территории страны с учётом стохастического характера речного стока и

водопотребления, других природных и антропогенно обусловленных процессов на водосборных территориях.

Крупный вклад сделан Г.В. Воропаевым в изучение и разработку проблемы водных мелиораций. С помощью результатов комплексных многолетних исследований водного режима почв, водного баланса и работы оросительных систем в аридной зоне им были научно обоснованы принципы комплексной реконструкции ирригации в стране как важнейшего средства повышения эффективности использования водно-земельных ресурсов.

В течение ряда лет Г.В. Воропаев был научным руководителем Государственной научно-технической программы по проблеме водопользования страны и территориального перераспределения водных ресурсов как составной части общей проблемы рационального природопользования. Исследования по этой программе проводились в соответствии с решениями и заданиями государственных органов. В рамках программы усилия более 130 (!) ведущих научных организаций страны впервые были скоординированы и направлены на проведение натурных и модельных исследований для прогнозной оценки влияния изменений водного режима на природную среду, климат, продуктивность экосистем, экономику регионов в районах изъятия, транспортировки и использования стока. Были получены уникальные научные результаты, позволяющие представить современное состояние водных проблем и обосновать пути их решения, меры по защите и сохранению уникальных экосистем, снижению отрицательного воздействия на природную среду. В 1985 г. Институтом водных проблем, как головной организацией была издана итоговая монография (с грифом «для служебного пользования») «Проблема территориального перераспределения водных ресурсов» под редакцией Г.В. Воропаева и Д.Я. Ратковича, в которой обобщены результаты выполненных всеми коллективами исследований по проблеме и обоснованы направления их дальнейшего развития. Следует отметить, что полученные на основе многолетних исследований результаты, несомненно, не потеряли своей актуальности и представляют большой интерес для науки и практики.

Проблема территориального перераспределения водных ресурсов на протяжении многих лет находилась в центре внимания учё-

ных и общественности, вызывала ожесточенные дискуссии, ей были посвящены многочисленные публикации. В этот период на фоне сложной экономической ситуации в стране разворачивается агрессивная общественная кампания против программы переброски. Центральный Комитет КПСС и Совет Министров СССР постановлением №978 от 14 августа 1986 «признал целесообразным прекратить проведение проектных и подготовительных работ по переброске части стока северных рек в реку Волгу».

К сожалению, это был очень тяжёлый, можно сказать трагический период в жизни Григория Васильевича, поскольку критика и нередко голословные обвинения свелись к борьбе против головного института и его директора. Именно тогда наиболее ярко проявился решительный характер Г.В. Воропаева, его гражданское мужество, честность, принципиальность, бескомпромиссность в отстаивании своих научных позиций.

Под руководством Г.В. Воропаева в Институте водных проблем сформировался высококвалифицированный научный коллектив, были развёрнуты комплексные исследования водных проблем страны, объединившие многочисленные научные коллективы, создан научно-исследовательский флот на Каспийском море, Волге и Северной Двине, образованы научно-исследовательские станции и базы.

Григорий Васильевич – автор более 400 научных статей и брошюр, 8 монографий, методических разработок, нашедших широкое практическое применение. В числе наиболее значимых работ можно отметить следующие: Физико-географические основы формирования водохозяйственных балансов. М.: Наука, 1981. 136 с. (совместно с В.Б. Местечкиным); Теория и методы управления ресурсами вод суши. М.: Наука, 1982. 174 с.; Геолого-геоморфологические исследования Каспийского моря. М.: Наука, 1983. 151 с. (совместно с Л.И. Лебедевым, О.К. Леонтьевым); Оптимизация планирования водного хозяйства промышленных районов. М.: Наука, 1985. 123 с. (совместно с О.В. Тютковым); Регулирование и комплексное использование водных ресурсов. М.: Наука, 1987. 156 с.; Роль водных ресурсов в жизни страны. М.: Наука, 1987. 111 с. (совместно с С.Л. Вендровым); Проблемы управления водными ресурсами Арало-Каспийского региона. М.: Наука, 2003. 427 с. (совместно с Г.Х. Исмаиловым, В.М. Федоровым) и др.

Под его руководством 15 молодых учёных и аспирантов подготовили и защитили кандидатские диссертации, а позднее стали докторами наук.

Григорий Васильевич руководил работой ряда научных советов и научных программ, активно участвовал в работе комитетов по Ленинским и Государственным премиям, был вице-президентом Международной комиссии по водным ресурсам международной ассоциации гидрологических наук Международного геофизического союза (1979–83 гг.), председателем Национальной гидрологической комиссии СССР (1978–90 гг.), членом Бюро Отделения океанологии, физики атмосферы и географии АН, председателем и членом целого ряда отечественных и международных комитетов и комиссий. В феврале 1983 г. Г.В. Воропаев был утверждён членом Госплана СССР и назначен председателем Государственной экспертной комиссии (ГЭК) Госплана СССР. Его деятельность способствовала внедрению достижений науки при обосновании крупных водохозяйственных проектов и их высококвалифицированной научной экспертизе в целях оздоровления экономики в ряде регионов страны. В те годы экспертные заключения и рекомендации ГЭК имели большое значение в принятии правительственных решений по рассматриваемым проблемам.

Г.В. Воропаев был председателем Научного совета «Научные основы управления режимом и ресурсами вод суши», объединившего известных учёных страны в этой области. Совет координировал выполнение крупных государственных научно-технических программ по проблемам водообеспечения, комплексного использования и охраны водных ресурсов страны, в реализации которых участвовало более 100 научных коллективов.

В 1988 г. Григорий Васильевич возглавил созданный им Научно-координационный центр «Каспий», работа которого была непосредственно связана с ИВП РАН. Он успешно руководил исследованиями по проблеме Каспийского моря, принимал деятельное участие в работах Межгосударственной комиссии по научно-техническому сотрудничеству на Каспии.

Более 18 лет Г.В. Воропаев был главным редактором журнала «Водные ресурсы», широко признанного в нашей стране и за рубежом. Он возглавлял редколлегию академической серии «Каспийское море», в которой обобщались результаты исследований по гид-

рофизике, гидрологии, гидрохимии, гидробиологии, нефте- и газо-ности, палеогеографии, ихтиофауне, биоресурсам, геологии и неотектонике Каспийского региона.

Григорий Васильевич Воропаев уважал чужое мнение, обладал очень широким научным кругозором, быстро вникал в обсуждаемые проблемы и никогда не боялся критики. Он не был апологетом правительственных решений, в том числе и по проблеме переброски стока, но всегда боролся с некомпетентностью и несправедливой критикой.

Научные заслуги Г.В. Воропаева отмечены правительственными наградами: советскими орденами «Знак Почёта», Дружбы народов, медалью «За доблестный труд», а также российской медалью к ордену «За заслуги перед Отечеством» II степени (1999 г.).

М.И. Степанова (ИВП РАН),

В.А. Широкова (ИИЕТ РАН),

А.Н. Гельфан (ИВП РАН)

Некоторые вопросы управления использованием водных ресурсов¹

Г.В. Воропаев

Рассмотрены правовые и экономические аспекты проблемы управления использованием водных ресурсов международных рек. Сформулированы возможные подходы к их решению, опирающиеся на двуединую роль вод как элемента окружающей природной среды и возобновляемого экономического ресурса. Выдвинуто предложение о разграничении прав собственности на водные объекты (реки, озера, моря) и водные ресурсы (возобновляемые водные массы). Подчеркиваются первостепенная роль долговременных договоров в организации рационального водопользования, а также значение бассейновых проектов комплексного использования и охраны водных ресурсов.

Проблема управления использованием водных ресурсов в нашей стране в основе своей является международной, потому что значительная часть рек страны относится к международным как по условиям размещения на территории их водосборов нескольких государств, так и по условиям поступления речного стока в устьевые области и моря. Кроме того, она относится к межгосударственным проблемам в связи с качественно новыми отношениями между бывшими союзными республиками, приобретающими статус суверенных государств. Поэтому крайне важно оценить экономические и политические интересы каждого независимого территориального образования, размещающегося на водосборной площади речного или морского бассейнов, выявить интересы и конфликтные ситуации, оценить возможные пути их решения, учитывая имеющийся опыт. При этом вряд ли можно извлечь что-то конструктивное из опыта водопользования в отдаленное историческое время, когда войны были единственным способом решения конфликтных ситуаций. Более полезен опыт последних десятилетий, когда стали складываться и эффективно действовать международные организации, а межгосударственные отношения приобретают истинно равноправные формы.

¹ Воропаев Г.В. Некоторые вопросы управления использованием водных ресурсов // Водные ресурсы, 1992. №5. С. 5–11.



Рис. 1. Схема водохозяйственного бассейна:
цифры в квадратах - субъекты водопользования: 1 – орошаемые земли, 2 – промышленные и городские объекты, 3 – административные границы, 4 – гидротехнические сооружения, 5 – направление течения реки

На рисунке представлена схема речного бассейна, территория которого административно-политическими границами отнесена к ведению четырех государств 1, 2, 3 и 4 (назовем их субъектами); кроме того, река впадает в море 5, являющееся международным объектом. Рассмотрим, как могут повлиять меры по управлению водными ресурсами, осуществляемые расположенным выше по реке субъектом 1, на интересы расположенных ниже. В верхней части бассейна, как правило, формируется основной объем речного стока, и при создании водохранилищ здесь появляются благоприятные условия для использования электроэнергии; водохранилища могут иметь и рекреационное значение. Здесь же могут быть размещены высокоэффективные горнодобывающие производства с использованием воды для флотации и обогащения руд, загрязняющие основной водоток. В то же время в верхней части бассейнов, особенно горных, как правило, мало пригодных для земледелия территорий, в целом потребность в воде для коммунальных, промышленных и иных целей может быть невелика. Однако, создавая водохранилища, субъект 1 может кардинально изменить внутригодовой, а часто и межгодовой режим речного стока, резко увеличив зимние расходы воды и сократив летние.

Это повлияет на режим затопления земель в поймах и дельте реки, а также на режим притока в море. Следствием этого могут стать изменение растительности и потеря кормовых ресурсов в поймах, сокращение или потеря нерестилищ и рыбного стада, особен-

но проходных и полупроходных рыб, ухудшение условий обитания диких животных и развития растительных сообществ, изменение условий для водозаборов и судоходства и многое другое. Возможны и некоторые благоприятные эффекты, например, исключение катастрофических наводнений, ликвидация остро маловодных лет и периодов года. В любом случае, действия субъекта 1 оказывают наиболее радикальное влияние на условия водопользования, а нижерасположенные субъекты не всегда смогут найти меры, которые бы компенсировали потери.

Субъекты, расположенные ниже по реке (например, 2 и 3), могут быть заинтересованы в определенном количестве воды для орошения земель и водоснабжения крупных поселений. При этом для них важны как режим поступления воды, так и ее качество. Однако своими мерами по управлению водными ресурсами они не всегда могут достигнуть желаемого. Создание водохранилищ, регулирующих речной сток, может быть затруднено по рельефным соображениям; очистка воды от поступивших сверху загрязняющих веществ может быть либо неоправданно дорогой, либо вообще проблематичной. Наконец, возросшие потери воды на испарение в верхних водохранилищах и на другие цели могут ограничить поступление ее для нижерасположенных субъектов, породив невосполнимый дефицит.

В еще более сложной ситуации может оказаться субъект 4. Поступающая к нему вода может стать непригодной ни для каких целей, хотя ранее наличие воды и ее качество предопределили развитие экономики всего этого региона. И так же, как и субъекты 2 и 3, субъект 4 не может предпринять какое-либо эффективное действие для защиты своих интересов. Наконец, в судьбе моря 5 может быть заинтересован ряд государств, использующих его ресурсы; в этом случае изменение режима притока и качества вод подрывает ранее сложившиеся промыслы и формы природопользования. Можно привести десятки конкретных конфликтных ситуаций, аналогичных рассмотренным, однако при этом трудно отыскать реальные случаи успешного их разрешения.

Какими путями могли бы решаться задачи и на какой основе можно построить управление использованием водных ресурсов? Опыт водопользования позволяет сформулировать следующие подходы.

Первый подход. Все административные границы совмещаются в полном соответствии с гидрологическими; водные ресурсы в равной мере являются собственностью всех потребителей речного бассейна. Управление использованием вод происходит централизованно. Такая ситуация имеет место там, где исторически вся площадь речного водосбора принадлежит одному государству. Это чаще мелкие и средние бассейны, однако имеются и крупные. Здесь проблемы межгосударственного управления нет.

Второй подход. Водные ресурсы также являются собственностью всех потребителей речного бассейна, хотя на его территории размещаются несколько самостоятельных государств. Водопользование осуществляется на основе единого долговременного экономического соглашения. Близкая к этому ситуация имела место в отношении бассейнов рек межреспубликанского значения до того момента, пока не были провозглашены суверенные права республик, а законодательство не закрепило право на воду за теми территориями, где она формируется. Управление водопользованием на таких бассейнах выполнялось централизованно, а право на объем и виды водопользования устанавливалось на основе взаимно согласованных и утвержденных «Генеральных схем комплексного использования и охраны водных ресурсов» соответствующего бассейна. «Схемы...» выполняли роль договоров при директивном способе их разработки и утверждения со стороны центра.

Третий подход. Водные ресурсы являются собственностью той территории, на которой они формируются, и используются каждым субъектом, исходя из реально складывающихся условий. Последние изменяются в зависимости от действий соседних субъектов. Такая ситуация сложилась, например, при использовании воды рек Тигра, Евфрата, Иртыша, Амударьи и многих других, где до сих пор нет соответствующих договорных международных соглашений, регламентирующих права и обязанности каждого субъекта. Следует отметить, что в мировой практике нет единых общепризнанных норм водопользования для международных рек, хотя этот вопрос и остается часто одним из наиболее трудных во взаимоотношениях стран. Не существует и положения о праве каждой стороны использовать половину водных ресурсов пограничной реки, как об этом иногда заявляют отдельные специалисты. Организация Объединен-

ных Наций привлекла внимание специалистов и политиков к этим проблемам, созданы постоянно действующие комиссии по водным ресурсам для всех основных регионов мира, однако правовые вопросы остаются нерешенными до настоящего времени.

Трудности правового решения вопросов водопользования не случайны. Водные ресурсы имеют следующие специфические особенности формирования и распределения по территории, которые отличают их от других природных ресурсов.

Первая - их воспроизводимость, возобновляемость в едином природном глобальном процессе водообмена. При этом скорость процесса водообмена в отдельных звеньях гидрологического цикла на Земле различна - от нескольких часов до многих тысячелетий. Для речного стока - основного источника водопользования - возобновляемость водных ресурсов удобнее рассматривать в годовом разрезе, выделяя ежегодно воспроизводимые ресурсы половодья и межени (периодов снего-, ледотаяния или дождей, зимы или сухих периодов и т.п.). Для практических хозяйственных целей используется понятие гидрологического года, в течение которого воспроизводятся водные ресурсы с сохранением их характерных черт внутригодового режима. С позиций возобновляемости водных ресурсов любое их использование не приводит к их исчерпанию, оно не должно только изменять условия формирования ресурсов. А таковыми являются процессы формирования и распределения атмосферных осадков, т.е. прежде всего характер подстилающей поверхности суши и действия человека на водосборе. С этих же позиций водные ресурсы по своей экономической природе отличаются от исчерпаемых ресурсов (нефть, газ, уголь, сланцы), но близки к ресурсам растительного и животного происхождения (травостой, продукция земледелия, лес, промысловые животные и рыбы и т.п.). Однако в сравнении с первыми и вторыми водные ресурсы в меньшей мере поддаются процессу искусственного накопления и хранения с расходом сверх их среднегодовой величины.

Вторая особенность водных ресурсов состоит в том, что в процессе их формирования водные массы перемещаются из районов их первичного появления на суше в другие районы в виде речных или подземных потоков. Мероприятия, направленные на сохранение воды в местах ее первичного появления (снегозадержание,

влагонакопление, закачки в подземные горизонты, строительство прудов и водоемов и др.), как правило, имеют локальные масштабы и мало изменяют русловой и подземный отток водных ресурсов в другие районы. На многих территориях собственный речной сток или подземные воды вообще не формируются в связи с малым количеством осадков и особенностями гидрогеологического строения. С учетом этой особенности водных ресурсов признание прав на воду за теми территориями (субъектами), на которых она формируется, ставит другие территории в условия существенной зависимости от первых и сохраняет для них большую неопределенность в действиях при водопользовании. Последнее положение у многих экономистов и политиков находит понимание и поддержку: ведь не делятся бесплатно с соседями нефтью, газом, лесом или другими ресурсами страны, на территории которых последние имеются даже в изобилии.

Учитывая упомянутые особенности формирования водных ресурсов, их двуединую роль как элемента среды и возобновляемого ресурса, возвратимся к рассмотренным трем возможным подходам реализации права собственности на источник и воду и права пользования (управления) водными ресурсами и водотоком. Очевидно, что все три подхода сохраняют практическое применение в решении вопросов установления права на водные ресурсы и управления ими, однако наиболее рациональная организация водопользования могла бы быть построена при соблюдении следующих принципов.

Водные источники, и прежде всего речные системы, как природные объекты, т.е. элементы природной среды (биосферы), неразрывно связаны с территорией, и право собственности на них должно рассматриваться вместе с правом собственности на соответствующие территории.

Водные ресурсы, как водные массы, формирующиеся в водных объектах, т.е. в речной сети, озерах, морях, и перетекающие в ежегодно возобновляемых размерах в другие регионы, необходимо рассматривать как составную часть единого гидрологического цикла в пределах всей водосборной площади бассейна и, следовательно, в равной мере принадлежащие всей территории и всем водопользователям.

Использование водных объектов допускается их собственником в любой форме и для любых целей, если оно не изменяет ежегодно возобновляемые объемы водных масс, перетекающих в нижерасположенные регионы, и их качество.

Использование водных объектов, связанное с изменением режима течений, объемов водных масс при перетоке на нижерасположенные территории, и их качества, допускается лишь на основе общего соглашения между всеми водопользователями, размещенными на территории водосборной площади.

Использование водных ресурсов всеми водопользователями осуществляется на основе взаимосогласованных долговременных договоров. Для речных бассейнов с дефицитом воды право каждой территории на объем используемой воды закрепляется в виде определенной доли формирующихся возобновляемых ресурсов.

Из изложенных принципов наиболее уязвим второй, и именно он определяет основы управляемого бесконфликтного водопользования. Принятие его является в значительной мере актом доброй воли государств, а для тех из них, где формируется основной речной сток, это означает как бы добровольный отказ от преимуществ, дарованных природой региону. В современных условиях нереально рассчитывать на быстрое принятие такого принципа повсеместно. Например, вряд ли Турция согласится сегодня поставить свое водопользование под международный контроль и добровольно гарантировать для Ирака и Сирии выполнение вытекающих отсюда обязательств. Вместе с тем государства, расположенные в бассейне Дуная, могут реализовать этот принцип и фактически уже реализуют многое из высказанных подходов на основе двух- и многосторонних межгосударственных соглашений. Можно отметить, что успеху заключения таких соглашений способствует близость политического строя, его демократический характер.

Применительно к сложившейся в нашей стране ситуации, а тем более с учетом возможной в ближайший десяток лет перспективы использования изложенных принципов управления водопользованием представляется единственным путем, способствующим стабилизации экономического положения бывших республик. Принятое сегодня водное законодательство, к сожалению, усиливает сепаратизм и ведет к разрушению основной базы устойчивого водообеспе-

чения для развития производительных сил многих регионов, поэтому представляется важным уяснение практических подходов к реализации названных принципов в настоящее время, понимая его как переходное (неустановившиеся понятия, критерии, связи и др.) к таким системам, где здравый смысл и гуманистические начала будут определяющими.

Для реализации изложенных принципов важное практическое значение имеет объективная информация о существующей и возможной эффективности использования водных ресурсов во всем бассейне и отдельных его регионах. Располагая такой информацией можно ставить различные задачи с помощью имитационных и оптимизационных подходов. Например, оценивать, как изменится экономика, какие эффекты (или ущербы) получают партнеры при принятии одним из них какого-либо решения в своих интересах. Можно будет ставить задачи выбора приемов водопользования, которые бы обеспечивали равноэффективные результаты всем субъектам. На основе таких подходов могут устанавливаться правила вододеления и водопользования, лимиты водозаборов, критерии качества вод, режимы экологических попусков и другие показатели, фиксируемые в договорных соглашениях. Подобная информация в большей степени концентрируется сейчас в упоминавшихся бассейновых «Схемах...». Видимо, в современных условиях этот документ сможет выполнять и функции, связанные с правовыми аспектами управления водопользованием. При этом при разработке «Схем...» перед их составителями должны быть поставлены соответственно и новые задачи, а сами «Схемы...» приобретут более весомое межгосударственное значение.

Значение материалов «Схем...» в решении вопросов управления водными ресурсами для стран содружества исключительно и первоначально. Аналогичные подходы могли бы быть применены и к международным рекам, когда между государствами нет столь тесного исторического союза, как между бывшими республиками. Однако и здесь незаменимы материалы типа бассейновых «Схем...». Методы разработки последних, видимо, будут несколько иными, в частности более агрегированными могут быть многие показатели развития экономики, упростится разработка многих охранных мер в связи с преобладающей частной собственностью на землю и дру-

гие средства, а также с более эффективной системой обеспечения выполнения правительственных решений и договорных обязательств. Некоторый опыт разработки подобных документов у международных организаций уже есть (проекты Замбези, Меконга и др.).

Важнейшее значение для реализации названных выше принципов будут иметь усилия ООН и ее комитетов и комиссий по разработке и принятию правовых норм и принципов межгосударственного водопользования. В связи с вероятным возрастанием в ближайшие годы роли, авторитета и действенности решений ООН по конфликтным вопросам необходимы активизация деятельности региональных комиссий по водным ресурсам, более широкое обсуждение социально-экономических аспектов водопользования, а также выработка объективных и гуманных подходов к их решению.

Однако при всем значении авторитета международного сообщества и взаимной информированности ключевая роль в реализации названных принципов принадлежит тем государствам, где формируются водные ресурсы, поэтому первостепенное значение должны иметь поиски сфер, объектов, форм взаимодействий, представляющих взаимный интерес, прежде всего долговременный, экономический. В ряде случаев государства, расположенные ниже по течению рек, должны будут пойти на предоставление определенных выгод в пользовании водотоком на их территории для расположенных выше территорий, например, для судоходства, рыбного лова, рекреации. Возможны соглашения о совместном строительстве гидросооружений, использовании земель для ирригации, льготах в пользу верхних государств по продаже сельхозпродукции, подаче электроэнергии и т. п. Иначе говоря, необходим комплекс мер по более широкой и углубленной интеграции экономики соседей на основе как общего водопользования, так и любых других сфер экономики и культуры. Как показывает исторический опыт, такая интеграция становится реальной и устойчивой, если государства-соседи имеют демократическое неантагонистическое социально-политическое устройство.

В условиях нашей страны все эти проблемы обострились, точнее, обнажились более рельефно в последние десятилетия. Централизованное директивное планирование использования всех ресурсов

бывших союзных республик привело, в частности, к созданию на их территории ряда узкоспециализированных сельскохозяйственных зон, экономика и социальные условия жизни населения которых целиком зависят от уровня водообеспеченности, а, следовательно, в новых условиях – от действий расположенных выше по рекам соседних государств. К настоящему времени, когда сложился всеобщий дефицит воды на основных реках южного склона содружества, а технические и организационные меры по водосбережению непосильны и, к сожалению, не дают пока существенного эффекта, решение общей проблемы водопользования невозможно без согласия между всеми водопользователями бассейна. При этом отправной позицией в достижении согласия должны быть фиксирование сложившегося современного вододелия и закрепление всех видов водопользования впредь до разработки уточненных «Схем...», их согласования и подписания на их основе новых договорных соглашений.

В последние 3-4 года в странах содружества идет активный процесс разрушения старых и создания новых структур управления. К сожалению, для отрасли «Водное хозяйство» этот в принципе нужный процесс проявляется пока только в отрицательных чертах. Во-первых, существовавшая ранее система учета водных ресурсов и их использования, далеко не совершенная, разделенная между несколькими министерствами и ведомствами, теперь - с реорганизацией союзного и республиканских Минводхозов, Мингео, Госкомгидромета СССР, созданием органов Госкомприроды и Министерства природных ресурсов и другими реорганизациями - разрушается, качество учета (точность, взаимоувязанность с гидрометданными, оперативность, полнота информации) резко ухудшилось. Во-вторых, снизился контроль за выполнением принятых ранее решений по улучшению использования и охраны водных ресурсов. Еще более безответственными стали все службы и должностные лица, по существу часто нет не только заинтересованных в исполнении решений, но и формально обязанных это делать. В-третьих, разрушается система долговременного планирования развития водохозяйственных мероприятий. Применительно к водным ресурсам, как и во многих других ведущих направлениях экономики, долговременное планирование является обязательным условием их рационального использования. Во всех странах разработке перспективных планов

использования водных ресурсов придается первостепенное значение. Последнее обусловлено спецификой водного хозяйства: длительные сроки проектирования и строительства, тесная взаимосвязь с интересами всех отраслей, необходимость учета последствий изменения водного режима и природной среды, высокая капиталоемкость объектов и др. В современных условиях вопросы разработки «Генеральных схем комплексного использования и охраны водных ресурсов» страны и отдельных бассейнов под давлением деструктивной критики и непродуманной реорганизации отодвинуты на второй план, значение их снижено, финансирование сократилось.

Таким образом, узловые вопросы управления и развития водопользования нуждаются в совершенствовании, при этом необходимы как пересмотр правовых положений, так и формирование системы органов управления, включая первичный учет и контроль за состоянием водных ресурсов, их охрану, вододеление, оценку перспектив рационального использования.

Основные направления научных исследований в области водообеспечения¹

Г.В. Воропаев, Д.Я. Раткович

За годы Советской власти валовый объем промышленной продукции увеличился в 200 раз. Площади орошаемых земель возросли с 4 до 20 млн га, выработка энергии на гидроэлектростанциях превысила 200 млрд кВт·ч. Повышается степень благоустройства населенных мест: потребление воды в жилищно-коммунальном хозяйстве городов достигло ~300 л/чел·сут. За этими фактами стоят увеличение объемов изымаемой из источников воды примерно в 8 раз и, как следствие, рост требований к обеспечению гарантированной водности рек.

Вода становится одним из ведущих ресурсов, влияющих на размещение производительных сил, а водообеспечение - все более значимым фактором в решении социально-экономических проблем, в том числе в формировании стоимости промышленной и сельскохозяйственной продукции.

Главный источник водных ресурсов в СССР как в настоящее время, так и в обозримой перспективе - поверхностные воды, по объему стока которых Советский Союз занимает второе место в мире (4,7 тыс. км³/год). Подземные воды, несмотря на значительно меньшие ресурсы, играют важную роль в питьевом и хозяйственном водоснабжении.

Суммарные изъятия природных вод в СССР в целях удовлетворения потребностей народного хозяйства и населения составляют ~10% объема речного стока, причем примерно половина использованных вод возвращается обратно в источники. Однако, несмотря на кажущееся благополучие, уже сейчас водохозяйственный баланс (сопоставление потребностей в воде с ее наличием в источнике) по многим речным бассейнам сводится с напряжением, что обусловлено следующими основными причинами:

- размещение водоемких потребителей не соответствует распределению водных ресурсов: на обжитые и хозяйственно освоенные территории южного склона (бассейны Черного, Азовского, Каспийского и Аральского морей), где сосредоточено производство 80%

¹ Воропаев Г.В., Раткович Д.Я. Основные направления научных исследований в области водообеспечения // Водные ресурсы, 1988. №1. С. 5-13

промышленной и 90% сельскохозяйственной продукции, приходится всего ~15% речного стока;

- размах межгодовых колебаний стока увеличивается по мере продвижения в аридную зону, где сосредоточена основная масса потребителей воды. Внутригодовое распределение стока обычно не соответствует внутригодовому распределению потребностей в воде, а возможности дальнейшего регулирования стока ограничены; это объясняется отсутствием благоприятных топографических условий для создания емких водохранилищ или неприемлемым затоплением сельскохозяйственных угодий, важных народнохозяйственных или культурно-исторических объектов, месторождений полезных ископаемых и т.д.;
- на реках необходимо сохранять некоторую гарантированную водность путем специальных попусков для обеспечения условий нереста, обводнения пойменных угодий, поддержания санитарных условий, функционирования гидроэлектростанций, создания судоходных глубин; в ряде случаев обобщенный попуск во много раз превышает заявки на изъятия воды из рек;
- основные речные системы густонаселенных районов страны замыкаются внутренними морями, для поддержания приемлемого гидрологического и гидробиологического режима которых также требуется пресная речная вода.

Наряду с объективными есть и субъективные причины нарастания напряженности водохозяйственного баланса: часть водных ресурсов растрачивается из-за нерационального использования. На многих оросительных системах имеют место значительные потери воды на фильтрацию, что требует облицовки каналов; водозаборные сооружения часто не оснащены водомерными сооружениями, что затрудняет контроль за режимом орошения и приводит к перерасходам воды; поливная техника используется в значительной мере только в дневное время, что обуславливает холостые сбросы воды; низкое качество планировки орошаемых земель приводит к перерасходам воды при поливах.

В промышленности недостаточными темпами внедряются безводные технологические процессы. Значительные объемы воды приходится затрачивать на удаление технологических отходов, и здесь также имеются значительные резервы воды, которые могут быть

высвобождены в результате перехода на безотходную или малоотходную технологию. Велики потери воды в коммунальном водоснабжении из-за несовершенства водопроводных сетей и арматуры, отсутствия учета и контроля использования воды (вследствие крайне низких тарифов).

Не меньшую, а, пожалуй, даже большую трудность в решении задач водообеспечения приносит загрязнение природных вод. До настоящего времени повсеместно речная сеть и водоемы выполняют роль канализационных систем для сбора, транспорта, захоронения и в какой-то степени очистки всех видов промышленного, сельского и коммунального загрязнения. Отсюда все наиболее тяжелые и трудно разрешимые проблемы: «цветение» водоемов (из-за перегрузки органикой), вторичное загрязнение вод отложениями ранее выпавших загрязнений, необходимость разбавления загрязненных вод в соответствии с санитарными и рыбохозяйственными требованиями.

Цель научно-технического прогресса в области водных ресурсов — водообеспечение развивающегося народного хозяйства страны с учетом решения социальных и экологических задач при минимальных затратах всех видов ресурсов. Ниже предпринята попытка сформулировать основные проблемы в этой области, требующие осуществления фундаментальных исследований.

1. К водным ресурсам относятся доступные для изъятия и направления на те или иные цели речные и подземные воды. В настоящее время начинают поддаваться управлению почвенные воды и в меньшей степени атмосферная влага; по мере развития науки и становления соответствующих методов управления эти виды природных вод также в той или иной мере будут переходить в категорию водных ресурсов.

Ресурсы поверхностных вод обычно отождествляют с речным стоком. В этом случае необходимо введение понятия о располагаемых водных ресурсах, поскольку весь речной сток использован быть не может; степень реального использования зависит от соответствия внутригодового распределения стока в естественных условиях внутригодовому режиму его использования. Таким образом, располагаемые ресурсы речного стока зависят не только от водности и режима источника, но и от особенностей водопользования. Благодаря

этому располагаемые водные ресурсы могут быть существенно, иногда во много раз увеличены с помощью водохранилищ, которые перераспределяют речной сток во времени. Располагаемые ресурсы могут быть увеличены также в результате территориального перераспределения речного стока.

Применительно к подземным водам ресурсы не должны отождествляться с запасами. Использование подземных вод может идти за счет сокращения подземного питания рек, сработки вековых запасов, а также благодаря уменьшению испарения с почвы при понижении уровня подземных вод в процессе использования. Таким образом, располагаемые ресурсы подземных вод зависят от того, какие воздействия на их уровенный режим и сток в реки признаются допустимыми.

Совместное использование поверхностных и подземных вод позволяет существенно увеличить располагаемые водные ресурсы благодаря функционированию подземных емкостей как регуляторов стока. Исследования и реализация такого управления водными ресурсами находятся в стадии становления и будут иметь значительный практический эффект.

В настоящее время установлено, что доступными мероприятиями можно существенно увеличить долю почвенной влаги, используемой растениями; ресурсы почвенных вод могут благодаря этому заметно увеличить располагаемые водные ресурсы, подлежащие использованию в сельском хозяйстве, однако размер речного стока при этом не возрастает; а может и снизиться. Что касается возможного воздействия на таяние ледников и увеличение осадков, то здесь в обозримом будущем преждевременно ожидать значительного эффекта. В связи с увеличением масштабов хозяйственной деятельности на водосборных бассейнах, естественно, встает вопрос о прямом и косвенном влиянии этих мероприятий на условия формирования стока и, как следствие, на режим и ресурсы поверхностного стока и другие компоненты водных ресурсов. Агроресомелиоративные мероприятия на водосборах оказывают существенное влияние на ресурсы почвенных вод; влияние на режим поверхностного и подземного стока оказалось пока не столь существенным, хотя на водосборах малых водотоков в ряде случаев должно приниматься во внимание. Не зафиксированы также значимые изменения влаго-

оборота в результате изменений характера подстилающей поверхности и ее испаряющей способности, в том числе под влиянием орошения земель. Однако такого рода процессы должны контролироваться на перспективу в связи с нарастанием степени антропогенных воздействий.

Более остро стоит вопрос о возможном влиянии на сток и другие элементы водного баланса антропогенных изменений климата. Большинство специалистов склоняются к мнению о предстоящем глобальном потеплении; однако масштабы изменений региональных характеристик водного баланса пока неясны даже по знаку. Исследования в этой области имеют важное значение для планирования мероприятий по водообеспечению страны, в особенности при решении экологических проблем, в том числе связанных с охраной окружающей среды (например, внутренних морей и озер).

2. Научно обоснованный прогноз потребностей в воде - основа рационального развития водного хозяйства. Сложившаяся практика прогнозирования водопотребления с сохранением (или даже нарастанием) темпов его роста пропорционально намечаемым темпам роста валовой продукции водопотребляющих отраслей искажает фактические задачи, стоящие перед водным хозяйством.

Необходимо подвергнуть анализу тенденции развития основных потребителей воды, в том числе тенденции изменения удельных нормативов водопотребления.

Наибольшие заявки на воду выдвигает орошаемое земледелие, что ставит на первый план методику обоснования оросительных норм. В условиях нарастающего напряжения водохозяйственного баланса и роста затрат на водообеспечение требует ревизии практика назначения оросительных норм, отвечающих теоретическому максимуму урожайности. Нужно решать вопрос о переходе на экономически обоснованные нормы, которые обеспечат минимум затрат на получение единицы продукции (с учетом затрат на водообеспечение).

При прогнозах водопотребления необходимо учитывать качество приходящих вод, которые будут доступны в данном районе для использования. Наиболее явно эта зависимость имеет место для ирригационного водопотребления, где нормы существенно увеличиваются с ростом минерализации воды.

В состав нормативных показателей должны включаться как удельные затраты воды, так и допустимое количество лет с ограничением нормированной подачи, степень этих ограничений, а в отдельных случаях (в остродефицитных по воде районах) допустимое группирование лет с ограничением водоподачи. При прогнозировании ирригационного водопотребления следует разработать подходы, учитывающие его стохастический характер.

3. В свете решений ЦК КПСС и СМ СССР о прекращении в текущей пятилетке строительных и проектных работ по переброске части стока на юг и интенсификации мероприятий по экономии воды важнейшее значение приобретает система мероприятий, обеспечивающих переход от экстенсивных к интенсивным методам водопользования: замена лиманного орошения правильным в бассейнах рек с напряженным водохозяйственным балансом; реконструкция оросительных систем и совершенствование технологии орошения в целях сокращения непроизводительных затрат воды; широкое освоение оборотных систем водоснабжения в промышленности, использование очищенных коммунальных сточных вод и ливневых сбросов для промышленного водоснабжения и орошения, применение раздельных систем технического и питьевого водоснабжения и др.; развитие искусственного воспроизводства рыбных запасов (в допустимой степени, с точки зрения сохранения генофонда) в целях сокращения затрат воды на нерестовые попуски; продолжение работ по шлюзованию рек, используемых в качестве водных путей, для уменьшения затрат воды на поддержание заданных габаритов судового хода; отказ, по возможности, от создания типов судов, требующих увеличения глубин судового хода на внутренних водных путях; сокращения сброса всякого рода загрязнений в гидрографическую сеть для уменьшения санитарных расходов воды.

4. В недавнем прошлом, когда водоснабжение заключалось в подводе воды от источника к потребителю, затраты на него были обычно незначительными по сравнению с хозяйственным эффектом у водопользователя; решение задач водоснабжения без учета «обратных связей» было оправданным. По инерции такой подход практически повсеместно сохраняется до настоящего времени, что нередко становится недопустимым. Стоимость мероприятий по водообеспечению достигает многих миллионов рублей и оказывается соизме-

римой с прочими видами затрат на получение продукции. В этих условиях размещение производительных сил должно непременно увязываться с водным фактором, принимаемая гипотеза развития экономики должна быть оптимизирована с учетом затрат на водообеспечение и водоотведение.

5. Все большее значение в проблеме водоустройства страны приобретает качество вод в источниках. Загрязнение их во многих бассейнах прогрессирует под влиянием нарастающих сбросов сточных вод промышленного и коммунального происхождения, дренажных и сбросных вод оросительных систем, жидких отходов скотоводческих комплексов, ливневых стоков с городских и промышленных территорий, а также в результате смыва удобрений и ядохимикатов тальми и дождевыми водами.

Необходимо подчеркнуть, что одним строительством очистных сооружений проблема не может быть решена. Экономически доступные методы очистки сточных вод удаляют из них обычно не более 90-95% загрязнений; очистка ливневых и дренажных вод, по-видимому, дает малый эффект; нормирование качества вод по так называемым предельно допустимым концентрациям (ПДК) вряд ли способствует радикальному решению проблемы (нередки случаи, когда наблюдается превышение ПДК в десятки и сотни раз, а водопользование осуществляется без ограничений); имеют место случаи попадания в водные источники веществ, для которых не установлены не только ПДК, но и отсутствует методика обнаружения их в речной воде либо необходимые для этого оборудование и реагенты; не поддается достоверной оценке кумулятивное воздействие загрязнений.

Таким образом, решение проблемы во многих случаях зависит не только от финансирования, хотя необходимые затраты на водоохраные мероприятия измеряются многими миллиардами рублей, но и от научного обоснования комплексной программы соответствующих мер и технического уровня их реализации. Пришло время, когда характеристика степени загрязненности природных вод обязательно должна учитываться при размещении объектов, требующих отвода сточных вод.

Следует подчеркнуть, что осуществление компенсационных мероприятий, направленных на охрану окружающей среды, при комплексном использовании водных ресурсов может не дать ожи-

даемого эффекта, если не будет достигнуто нужное качество вод. Так, например, комплекс мероприятий по оптимизации уроненного режима Каспия и солевого режима Азовского моря только в том случае приведет к ожидаемому повышению биологической продуктивности водных экосистем, если будет достигнуто качество вод, пригодных для нормального функционирования этих экосистем.

Важную роль в предупреждении и уменьшении загрязнения природных вод имеет внедрение безводных технологических процессов и оборотного водоснабжения в промышленности. При этом следует учитывать, что переход на оборотное водоснабжение сопровождается ростом потребляемой воды из-за потерь в охлаждающих агрегатах и на трактах замкнутого цикла. Таким образом, на крупных реках, где напряженность водохозяйственного баланса определяется обычно требованием на попуски воды, а водопотребление невелико по сравнению с ними, упор должен делаться на оборотное водоснабжение; на малых реках, где расходная часть водохозяйственного баланса формируется изъятием воды, оборотное водоснабжение будет увеличивать напряженность баланса, поэтому здесь нужно развивать водосберегающую и безводную технологию.

6. Специфический аспект проблемы качества вод - нарастание их минерализации на реках с интенсивным развитием орошения, в первую очередь на Сырдарье и Амударье, где соленость в пределах нижнего течения в отдельные периоды достигает 2-3 г/л. Этот процесс обусловлен двумя основными причинами: во-первых, необходимостью обеспечения естественного солевого стока при прогрессирующем сокращении водности (в противном случае будет происходить накопление солей на орошаемых землях); очевидно, что солевой баланс бассейна соблюдается лишь при росте минерализации в низовьях пропорционально сокращению водности реки (даже если игнорировать рассоление осваиваемых земель); во-вторых, низким техническим уровнем оросительных систем, обуславливающим большие фильтрационные потери воды. В результате вымываются соли не только из верхних слоев почвы, но и из подстилающих засоленных толщ грунтов.

В отдельных случаях существенным дополнительным источником солей является освоение сильнозасоленных земель (например, центральной Ферганы в Сырдарьинском бассейне).

Эта проблема приобретает все большее хозяйственное и социальное значение: она определяет величины стока воды, который должен резервироваться для выноса солей; необходимую степень облицовки каналов оросительных систем и другие мероприятия по борьбе с фильтрацией; возможность повторного использования дренажных вод; величину оросительных норм; состав мероприятий по водообеспечению населения, проживающего в пределах среднего и нижнего течения таких рек, а также по поддержанию необходимых санитарных условий, по сельскохозяйственному водоснабжению и т. п.

На Амударье и Сырдарье получил распространение отвод сильнозасоленных дренажных вод в естественные понижения местности. Это сдерживает нарастание минерализации речных вод, но сокращает устьевой сток и приводит к образованию обширных покрытых солью поверхностей, что при ветрах вызывает опасное засоление земель и неблагоприятные социальные последствия. Водоустройство указанных бассейнов в условиях дальнейшего развития орошения требует осуществления широкого комплекса мероприятий, научное обоснование которых имеет огромное значение, учитывая, что в бассейне Аральского моря проживает ~30 млн чел., а по демографическим прогнозам к концу столетия оно может приблизиться к 50 млн чел. Радикальным путем решения проблемы могло бы стать опреснение дренажных вод, но существующие методы опреснения и утилизации образующихся рассолов требуют непомерных затрат, поскольку объемы подлежащих деминерализации вод определяются на перспективу величиной порядка 10 км³ в год. Изыскание экономичных методов деминерализации с реальными энергозатратами приобретает в связи с этим особо важное значение.

Специфический характер приобретает осолонение низовьев рек, образующих эстуарии: в процессе сокращения стока из-за меньшего разбавления поступающих при нагонах морских вод соленость воды в эстуариях заметно возрастает, что приводит к угнетению сложившихся экосистем, затрудняет водоснабжение и использование вод для орошения (Азовское море, Днепро-Бугский и другие лиманы Черного моря). Намечаемые мероприятия по управлению водо- и солеобменом эстуариев с морем требуют дополнительного экологического обоснования.

7. Водное законодательство в СССР допускает введение платы за водопользование и сброс в источники использованных вод. Представляется, что практическое применение этой законодательной меры явится наиболее эффективным средством, позволяющим добиться экономии воды и ввести в систему учет водного фактора при планировании размещения производительных сил. Разумеется, ощутимый эффект может быть достигнут только при существенно дифференцированной сетке оплаты в зависимости от достигнутой степени использования стока реки и загрязненности ее теми или иными веществами (плата за сброс сточных вод при этом должна зависеть от количества и состава вносимых загрязнений, оказывая сдерживающее влияние на сброс ингредиентов, которыми река уже нагружена). Тарифы за воду не должны быть символическими; влияние их на себестоимость продукции, получаемой водопользователем, должно быть значимым и позволять наиболее объективно и полно отражать реальную стоимость воды как природного ресурса, включая все затраты по доставке и технологии ее использования. В связи с этим потребуется пересмотр системы оптовых, а возможно, и розничных цен на соответствующую продукцию. Учитывая последствия введения платного водопользования, этот вопрос требует глубокого экономического анализа. Однако без его решения возможность существенного упорядочения водопользования остается проблематичной.

8. Проблему водообеспечения страны необходимо решать с учетом социальных аспектов, и, прежде всего: обеспечения требований питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения к количеству и качеству гарантируемых в этих целях объемов воды; обеспечения занятости населения (с учетом естественного прироста) в традиционных сферах, связанных с режимом водных источников, их водностью и качеством вод, или создания новых рабочих мест в отраслях хозяйства, функционирование которых не будет ущемляться при возможном нарушении режима природных вод и водных объектов; сохранения связанных с режимом водных объектов условий для отдыха, спорта, рекреаций или развития альтернативных путей удовлетворения указанных потребностей общества.

Следует разработать методику учета социальных процессов и запросов при проектировании водохозяйственных мероприятий.

9. Специального углубленного анализа требует проблема функционирования водных и земноводных экосистем в условиях комплексного использования водных ресурсов. Особенностью ее являются противоречия между требованиями флоры и фауны к сохранению исторически сложившегося водного режима, с одной стороны, и с другой - требованиями народного хозяйства, удовлетворение которых невозможно без изменений этого режима, включая: выравнивание колебаний стока в многолетнем разрезе; трансформации внутригодового распределения водности в соответствии со спецификой народнохозяйственного комплекса, тяготеющего к данному водному объекту; уменьшение водности вследствие изъятий на водоснабжение, орошение и другие цели; существенное повышение уровня воды в пределах водохранилищ и на прилегающих территориях; нарушение режима минерального и органического стока, а также условий, влияющих на биохимические процессы; загрязнение вод в результате хозяйственной деятельности в пределах водосборных бассейнов.

Фактический ход событий привел к существенному угнетению, а в некоторых случаях - к разрушению сложившихся водных и береговых экосистем. Во многих случаях неблагоприятное развитие событий продолжается. Ответственность за негативные последствия лежит не только на организациях министерств и ведомств, ответственных за водообеспечение народного хозяйства (в том числе гидроэнергетики), но и на организациях, ведающих вопросами эксплуатации указанных экосистем и охраной окружающей среды. Так, в течение десятилетий Минрыбхоз СССР ограничивается подсчетом ущербов рыбному хозяйству, наносимых гидроэнергетикой и другими видами водопользования, вместо разработки научно обоснованных требований и рекомендаций к режиму водных объектов и определения допустимых ограничений в этих требованиях. Водохозяйственные организации, не озадаченные такими требованиями, не учитывают их в проектах, а реальная необходимость решать задачи водообеспечения приводит к реализации таких инженерных и других решений, которые недостаточно учитывают интересы рыбного хозяйства или не учитывают их вообще.

В настоящее время взаимосвязь между режимом водных объектов и продуктивностью экосистем изучена совершенно недостаточ-

но; оценка реакции практически любой региональной экосистемы на те или иные изменения водного режима носит, как правило, экспертный характер при неизвестной степени достоверности. Если в ближайшее время в этом деле не будет достигнут коренной перелом, следует ожидать накопления необратимых экологических последствий по все большему числу водных объектов.

10. По мере возрастания потребностей в воде все большее значение приобретает оптимальное управление водными ресурсами, которое включает управление режимом искусственных и естественных водных объектов (в том числе режимом качества воды) в интересах различных отраслей народного хозяйства, сферы социального развития, обеспечения требований по охране среды; распределения водных ресурсов между отраслями хозяйства и отдельными водопотребителями; распределения водных ресурсов между регионами и их речными бассейнами.

С целью решения проблемы оптимального управления водными ресурсами необходимо развитие научных исследований, направленных на создание математических моделей укрупненных водохозяйственных систем, обоснование критериев оптимальности в условиях многокритериальных задач, развитие теории регулирования стока системами и каскадами водохранилищ. Существенное значение имеет распространение методических подходов на случаи стохастического водопотребления. В связи со специфическим характером состава водопользователей и особенностями режима отдельных водных объектов наряду с развитием общих методических подходов требуется научное обоснование математических моделей региональных водохозяйственных комплексов.

В условиях Советского Союза первостепенное значение приобретает специфическая проблема управления режимом внутренних водоемов (морей и озер), в которые впадают основные речные системы Европейской зоны и Средней Азии. Цель управления режимом внутренних морей - сохранение биологической продуктивности водных экосистем и оптимальных рекреационных условий побережий в условиях сокращения и изменения режима притока. С этой целью необходимо оптимизировать режим уровня средней солености, а также ее распределение по акватории, обеспечить условия транзита биогенного стока к местам нагула рыбы. В отдельных слу-

чаях предстоит оценить нарушения притока, за пределами которых могут произойти недопустимые нарушения режима внутренних водоемов. В число основных задач научных исследований в целом по проблеме входят математические модели гидродинамического режима конкретных объектов, а также разработка оптимальной стратегии дополнительного питания морей перебросками вод из сопредельных бассейнов в случаях, когда будут доказаны целесообразность и возможность осуществления этих мероприятий.

11. Как отмечалось выше, основным потребителем воды является орошаемое земледелие, развитие которого приурочено к зонам недостаточного и умеренного увлажнения. Известно, что использование единицы объема воды на юге дает существенно большую прибавку сельскохозяйственной продукции.

К 2000 г. орошаемое земледелие охватит ~30 млн га при современных площадях орошения примерно 20 млн га; не менее 7-8 млн га прироста приходится на зону недостаточного увлажнения (южнее линии Киев - Воронеж - Куйбышев). В то же время в зоне недостаточного увлажнения водные ресурсы крайне ограничены и возможности использования местных водных источников быстро исчерпываются как в условиях естественного режима, так и при зарегулировании. Поэтому неправильно априори всегда водопотребление связывать только с местными ресурсами.

Одновременно в этой зоне с возрастанием изъятий воды на орошение и другие экономические и социальные цели неизбежно увеличивается неблагоприятное воздействие на окружающую среду и в целом на экологическую обстановку.

Учитывая, что воздействие на среду в зоне недостаточного и умеренного увлажнения оказывается существенно бо́льшим, чем по зоне избыточного увлажнения, в принципе правомерно привлечение водных ресурсов этой зоны для покрытия потребностей в воде густонаселенных и хозяйственно освоенных зон юга ЕТС и Средней Азии.

Таким образом, объективно возникает необходимость направить часть водных ресурсов из многоводных бассейнов (с относительно небольшим водопотреблением в современных условиях и на перспективу) в бассейны с интенсивными изъятиями воды.

Одной из основных проблем пополнения водных ресурсов юга страны является установление водных объектов - доноров. Естест-

венно искать такие источники среди водных объектов зоны избыточного увлажнения, относящихся к бассейнам северного склона страны. При этом следует принимать во внимание как отдаленную перспективу развития и водообеспечения народного хозяйства в бассейнах этих объектов, так и прямое влияние намечаемых изъятий водных ресурсов на их режим и природную среду бассейнов в целом. При этом важно разработать такую стратегию водоустройства территории в зоне изъятий, которая не только исключит неблагоприятные последствия, но даст большой хозяйственный и экологический эффект для этой территории, например, повышение продуктивности лесов, хозяйственное освоение земель, лучшее использование пойменных земель и др. В целом следует исходить из позиции, что нарушение режима водных источников в любом случае не должно сопровождаться существенными неблагоприятными последствиями хозяйственного, природно-климатического, экологического или социального характера. В то же время, оценивая допустимость тех или иных вторжений в природную среду при осуществлении крупных водохозяйственных преобразований, следует учитывать, что развитие экономики неизбежно приводит к нарушениям естественных природных условий. Задача заключается в минимизации этих неблагоприятных воздействий для крупных регионов страны в зонах изъятия и транспортирования воды.

12. Существенное развитие должны получить системы питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, имеющего важное социальное значение. В решение этой задачи входит и распространение на малые города и сельские населенные пункты уровня водоустройства, отвечающего современным требованиям к жилищам. Решение этой проблемы на большей части территории не представляет существенных затруднений, за исключением низовьев рек, интенсивно используемых для орошения (по критериям качества воды, в том числе минерализации), и безводных районов (типа городов Балхаш, Шевченко, п-ова Мангышлак и т. п.). Здесь необходимо форсировать разведку месторождений пресных подземных вод, мероприятия по их охране от загрязнения фильтрующими водами коллекторно-дренажной сети, а в ряде случаев создавать деминерализационные установки относительно небольшой производительности.

Обобщая изложенное, можно сделать вывод, что основными направлениями дальнейших исследований в области изучения, рационального использования и охраны водных ресурсов являются:

- развитие современных методов изучения режима вод суши и их качества (включая дистанционные с использованием космической техники, изотопные и др.);
- создание математических моделей гидрологического цикла и его составляющих для оценки возможного изменения режима и ресурсов природных вод под влиянием антропогенных изменений климата; разумеется, основу этих исследований должно составлять дальнейшее углубленное обоснование современных изменений климата, в том числе обусловленных хозяйственной деятельностью;
- разработка достоверных методов прогноза водопотребления в условиях научно-технического прогресса;
- разработка научных основ государственной политики в области охраны природных вод от загрязнений;
- обоснование комплексной программы мероприятий по борьбе с нарастанием минерализации рек, сток которых интенсивно используется для орошения; программа должна предусматривать также охрану от засоления подземных вод и почвогрунтов;
- обоснование методики учета водного фактора при размещении производительных сил; комплексный анализ вопроса о введении платы за специальное водопользование (включая использование водных объектов для сброса загрязненных или термальных вод);
- разработка методики учета социальных процессов и запросов при проектировании мероприятий, оказывающих влияние на режим водных объектов;
- изучение общих и региональных зависимостей между функционированием водных и околотоводных экосистем, с одной стороны, и характеристиками режима водных объектов - с другой; разработка методологии экологических прогнозов;
- развитие теории оптимального управления режимом естественных и искусственных водных объектов (включая их системы и каскады) в условиях комплексного использования водных ресурсов;
- комплексное изучение проблемы территориального перераспределения водных ресурсов;

- участие в международных программах по изучению водных ресурсов, их математических моделей, теории управления, а также по проблемам использования международных водных объектов и их ресурсов.

Долотов Юрий Сергеевич

(28.02.1931 – 18.10.2012)



Юрий Сергеевич Долотов – член-корреспондент РАН, известный учёный в области геоморфологии моря, специалист по процессам в прибрежной зоне моря, проблемам рационального, экологически безопасного использования биологических, геологических, энергетических и других ресурсов прибрежных областей Мирового океана.

Юрий Сергеевич окончил географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1954 г. и поступил в аспирантуру Института океанологии им. П.П. Шир-

шова АН СССР. После окончания аспирантуры остался работать в Институте океанологии до 1969 г. В 1962 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1991 г. – докторскую диссертацию по географическим наукам.

С 1969 г. Юрий Сергеевич работал в Отделении океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР, где занимался научной и научно-организационной деятельностью. В 1997 г. избран членом-корреспондентом РАН по Отделению океанологии, физики атмосферы и географии. В 2001 г. был переведён в Институт водных проблем РАН на должность главного научного сотрудника Лаборатории гидродинамики, где проработал 11 лет.

Ю.С. Долотов был учеником известного морского геолога В.П. Зенковича, основателя российской школы геологов – специалистов в области изучения берегов. Юрий Сергеевич посвятил свою научную деятельность изучению прибрежной зоны морей и океанов. В 1955–2004 гг. работал в десятках экспедиций, охвативших исследованиями многие интереснейшие места Земного шара – оз. Байкал, Каспийское, Баренцево, Балтийское, Чёрное моря,

Гавайские и Галапагосские острова, атоллы Индийского океана, и самое любимое – Белое море. Исследованные им коралловые берега атолла Диего Гарсия больше не удалось изучить никому из российских учёных (там была создана американская военная база).

Выполненные Ю.С. Долотовым и его коллегами стационарные исследования процессов рельефо- и осадкообразования в Балтийском море также не имели аналогов. Собранные обширные экспедиционные материалы, характеризующие физические и геологические процессы в прибрежных зонах, позволили выявить роль колебаний уровня моря и вертикальных тектонических движений в эволюции берегов; понять закономерности перемещения, дифференциации и накопления прибрежных наносов под воздействием гидродинамических факторов. Указанные работы, выполненные на побережьях различных типов, в сопоставлении с исследованиями других учёных, позволили Юрию Сергеевичу построить типизированные модели рельефо- и осадкообразования в прибрежной зоне с разными динамическими условиями. Это крупное фундаментальное исследование имело важное практическое значение для поиска и разработки полезных ископаемых на шельфе.

К числу наиболее значимых научных результатов Ю.С. Долотова относится выявление динамических условий формирования толщи прибрежных отложений под воздействием морского волнения. Им разработана оригинальная методика и проведён большой объём исследований по новому для отечественной науки направлению, связанному с анализом механизма формирования слоистости толщи прибрежных отложений как важнейшего генетического признака и поискового критерия полезных ископаемых осадочного происхождения (нефть, газ, россыпи редких минералов). Юрию Сергеевичу удалось обосновать чёткие критерии выделения различных типов береговых зон, что нашло широкое практическое применение в решении проблемы реконструкции динамических палеообстановок.

В последние годы приоритетной областью работ для Юрия Сергеевича стало Белое море. В 2000–10 гг. он был научным руководителем крупного комплексного проекта по исследованию устьевых и открытых участков приливных побережий Белого моря. С 2000 г. каждое лето проводились комплексные экспедиции по изучению особен-

ностей физических, химических, геологических и биологических процессов в эстуариях и береговых зонах с различными динамическими условиями. Ю.С. Долотов принимал активное участие в полевых исследованиях, был научным организатором и идейным вдохновителем этих работ.

Результаты научных исследований Ю.С. Долотова (с соавторами) опубликованы в более чем 150 статьях и 5 монографиях: «Процессы прибрежно-морского россыпеобразования» (1977); «Дифференциация осадочного материала и слоистость прибрежных отложений» (1982); «Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления» (1989), «Проблемы рационального использования и охраны прибрежных областей Мирового океана» (1996), «Процессы рельефообразования и осадконакопления на приливных побережьях Мирового океана» (2010).

Помимо научной творческой работы Ю.С. Долотов вёл активную научно-организационную деятельность в качестве заместителя главного редактора журнала «Океанология», члена бюро секции «Берега» Комиссии РАН по проблемам Мирового океана, члена редколлегии Международного журнала «Journal of Coastal Research». Он работал в составе Секции «Экология и охрана окружающей среды» Межведомственного совета по присуждению премий Правительства РФ в области науки и техники, Комиссии по морской географии Международного географического союза, Научном совете по вопросам берегозащиты Балтийского моря при администрации Калининградской области; был представителем РАН в составе правительственных делегаций на сессиях МОК ЮНЕСКО; неоднократно выступал в качестве приглашённого докладчика на российских и международных конгрессах, конференциях и симпозиумах.

Кроме общепризнанных научных заслуг Юрий Сергеевич обладал замечательной способностью вызывать к себе самые тёплые чувства и симпатии окружающих его людей за счёт душевной доброты, внимательного и искреннего интереса к людям, их проблемам, способности сопереживать, искреннего желания помочь, поддержать в трудную минуту, поделиться знаниями и опытом. Ю.С. Долотов отличался необычайной скромностью, свойственной настоящим интеллигентам.

В.Н. Зырянов (ИВП РАН)

Исследование термогидродинамических процессов и полей прибрежной зоны и эстуариев Белого моря¹

Ю.С. Долотов и др.

Введение

Публикуемые материалы являются результатом комплексных контактных и дистанционных наблюдений, которые позволили выявить некоторые закономерности пространственно-временной изменчивости наиболее важных океанологических характеристик. Несмотря на сравнительно длительную историю изучения Белого моря, до сих пор недостаточно изученной остается мезомасштабная и синоптическая изменчивость термогидродинамических полей, в особенности в эстуариях и заливах. Мезомасштабные процессы доминируют в формировании внутреннего и внешнего водообмена моря, определяют особенности распределения химико-биологических характеристик акваторий и функционирования его экосистемы. При этом наибольший вклад в формирование полей скорости и плотности в Белом море вносят полусуточные приливные движения. Именно их влияние приводит к формированию приливных фронтов в районах Горла и Соловецких островов. Сочетание приливов и стока рек приводит к образованию сложных полей скорости, плотности. Именно эти процессы вносят наибольший вклад в перераспределение взвешенного вещества, загрязнений между прибрежными и открытыми частями моря. Взаимодействие пресного стока и морских вод приводит к формированию фронтальных зон, барьерных эффектов, своеобразию термогидродинамического и химико-биологического режимов.

Материалы и методика исследований

Сбор полевого материала осуществлялся в 2000–2001 гг. В летний период 2000 г. (июнь, сентябрь) на НИС «Эколог» в Онежском и Кандакшском заливах были проведены комплексные детальные исследования приливов и отливов, связанных с ними течений, пресного

¹ Ю.С. Долотов, Н.Н. Филатов, П.М. Бояринов, Р.Э. Здоровеннов, В.Н. Коваленко, В.Х. Лифшиц, Н.И. Пальшин, М.П. Петров, А.В. Толстикова. Исследование термогидродинамических процессов и полей прибрежной зоны и эстуариев Белого моря. В кн. «Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов» / Петрозаводск. Изд. РИО КарНЦ РАН. 2003. сс. 15–24.



Рис. 1. Схема расположения гидрологических станций в районе Керетского рейда

речного стока, характера перемещения осадков, изменения донного рельефа и состава отложений, динамики температурной и солевой стратификации вод. Методика исследований включала выполнение стандартных разрезов, суточных якорных станций и установку автономных буйковых станций длительного действия, оснащенных норвежскими приборами фирмы «Aanderaa Instruments» для измерений уровня и придонной температуры воды – WLR-5, скорости и направления течений, температуры, солености – RCM-4, термокос TR-1. На станциях стратификация вод по температуре и электропроводности (солености) изучалась с помощью термосолезонда Quanta и Seabirds. Отбор проб воды осуществлялся батометром, а донных осадков в Большом Керетском рейде, в проливах Глубокая и Средняя Салма – дночерпателем. Для внедрения современных методов оценки качества вод по таким параметрам, как концентрация хлорофилла-а, растворенной органики и минеральной взвеси, были выполнены подспутниковые эксперименты с измерением контактными методами растворенного органического вещества (РОВ), минеральной взвеси (МВ) и Хлф-а.

Основные характеристики используемых приборов с указанием измеряемых параметров, диапазона измерений, точности и разрешающей способности приведены в табл. 1.

Карта-схема разрезов и станций в районе Керетского рейда, где проводились работы в сентябре, показана на рис. 1.

Таблица 1

Прибор	Параметры	Диапазон	Точность, разрешение	Производитель
TR-1	Температура, °С, 11 каналов	-2,46—+21,48	±0,15, 0,02	Aanderaa (Норвегия)
RCM-4	Температура, °С электропроводность, мМО скорость течения, см/с направление, град.	-0,34—+32,17 0—70 1,5—200 0—360	±0,15, 0,03 2%, 0,1% ±1, 2% ±3, 3	Aanderaa (Норвегия)
WLR-5	Температура, °С давление, Па	-3—+35 0—400	±0,1, 0,04 ±0,001%	Aanderaa (Норвегия)
TC1	Температура, °С, электропроводность, мСм/см	-2—+30 0—70	±0,05, 0,01 ±1%, 0,03%	ИВПС Кар. НЦ РАН
Sea-bird	Температура, °С электропроводность, мСм/см глубина, м	-2—+30 0—70 0—400	±0,01, 0,005 ±0,001, 0,0005 ±0,1%, 0,25%	«Sea-bird electronics» (США)
Quanta	Температура, °С электропроводность, мСм/см Содерж. кислорода, мгО/л рН глубина, м	-5—+50 0—100 0—50 2—12 0—100	±0,2, 0,01 ±1%, 1 ед. ±0,2, 0,01 ±0,2 ед. ±0,1, 0,1	Hydrolab (США)

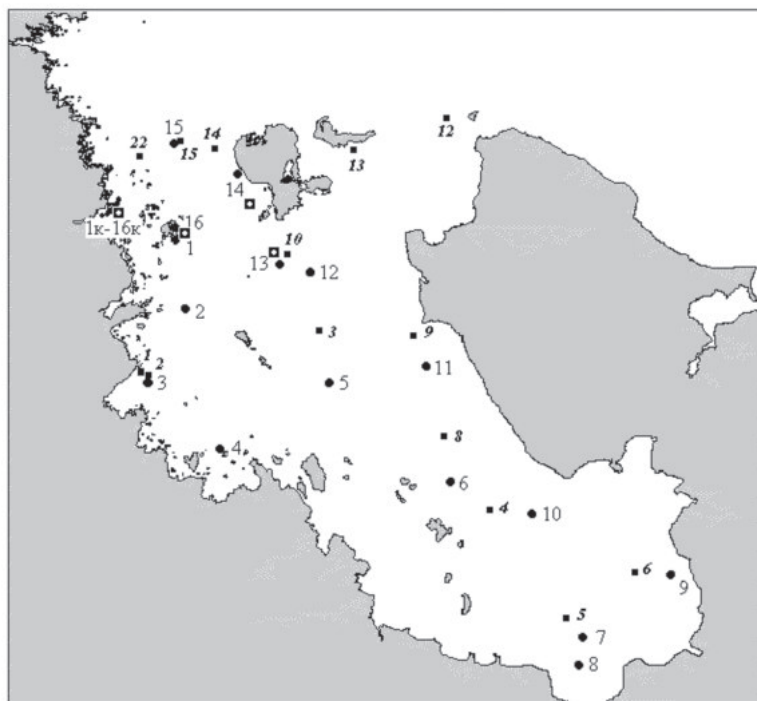
Анализ наблюдений, выполненных на акватории Керетского рейда, выявил в весенне-осенний период четкую стратификацию вод, присутствие двух слоев: верхнего, с максимальными температурами и минимальной соленостью, и нижнего, с минимальными температурами и максимальной соленостью (рис. 3). В нижнем, глубинном слое повсюду фиксировались минимальные температуры воды (до 1,5°С) и довольно устойчивые показатели солености (до 26,0–26,5о/оо). Хорошее перемешивание водной толщи в верхнем слое было обнаружено в наиболее динамичной части района – в Большом Керетском рейде, свидетельством чего является однородность показателей температуры и солености. Довольно хорошее перемешивание в нижнем слое зафиксировано в районе бухты Кереть. Границы раздела верхнего и нижнего слоев в обследованном нами районе, как правило, резкие. Распределение же в этом слое в период максимального отлива четко зафиксировано в довольно удаленном от устья районе (на выходе из пролива Средняя Салма).

Довольно значительные (для данного района) концентрации взвеси (0,4–0,7 мг/л) были обнаружены в верхнем распресненном слое в толще примерно до глубин 3 м, в морской части района (в

Таблица 2

Исходные данные

Автономные буйковые станции				СТД-съемки		
Прибор	Период измерений	Координаты		Прибор	Период измерений	Кол-во зондирований
		Сев. широта	Вост. долгота			
Устье р. Кемь (Рабочеостровск), 10–17 июня 2000 г.						
WLR	10–12.VI	65°01′	34°49′	ТС*	10–12 июня	38
О-ва Кузова 12-15 июня 2000 г.						
WLR	12–15.VI	64°55,85′	35°10,55′	ТС*	12–15 июня	65
RCM-4	12–14.VI	64°55,85′	35°10,55′			
TR-1	12–15.VI	64°55,85′	35°10,55′			
О-ва Заяцкие 16-17 июня 2000 г.						
WLR	16–17.VI	64°59′	35°39′	ТС*	15–17 июня	23
RCM-4	16–17.VI	64°59′	35°39′			
TR-1	16–17.VI	64°59′	35°39′			
Губа Чупа, 12-18 сентября 2000 г.						
WLR	12–15.IX	66°17,8′	33°44,8′	ТС*	14–17 сентября	12
RCM-4	16–18.IX	66°17,8′	33°44,8′			
TR-1	12–15.IX	66°17,8′	33°44,8′			
TR-1	12–15.IX	66°17,8′	33°44,8′			
WLR	16–18.IX	66°17,4′	33°37,1′			
TR-1	16–18.IX	66°17,4′	33°37,1′			
TR-1	17–18.IX	66°17,4′	33°37,1′			
Губа Чупа, 18-26 марта 2001 г.						
WLR	21–26.III	66°19′52″	33°39′53″	ТС*	21–26 марта	11
RCM-4	21–26.III	66°19′52″	33°39′53″			
TR-1	21–26.III	66°19′52″	33°39′53″			
Устье р. Кеми, 4-7 июля 2001 г.						
TR-1	4–7.VII	65°00,15′	34°49,58′	Sea-bird	4–6 июля	17
RCM-4	4–7.VII	65°00,15′	34°49,58′			
WLR	4–7.VII	65°00,15′	34°49,58′			
Онежский залив, 10-14 июля 2001 г.						
RCM-4	11–12.VII	64°50,89′	35°47,37′	Sea-bird	10–14 июля	52
RCM-4	13–15.VII	64°54,80′	35°09,27′			
Онежский залив, 2-6 сентября 2001 г.						
RCM-4	5.IX	65°05,42′	35°11,42′	Sea-bird, Quanta	2–6 сентября	28
RCM-4	5–6.IX	65°02,53′	35°04,44′			



- 1к - июль, устье р. Кемь
- 5 - июль, Онежский залив
- 12 - сентябрь, Онежский залив
- - АБС

Рис. 2. Схема расположения гидрологических станций в Онежском заливе Белого моря (июль, сентябрь 2000–2001 гг.)

Большом Керетском рейде) в период максимального отлива. Еще большие концентрации взвеси (порядка 1 мг/л и больше) с однородным ее распределением в толще верхнего распресненного слоя мощностью около 3–4 м, отмечались в отлив и на выходе из пролива Средняя Салма.

В период исследований в эстуарии р. Кемь (4–7 июля 2001 г.) температура на поверхности воды изменялась от 9,7 до 15,9°C, а в придонных слоях – от 8,7 до 11,6°C (рис. 4).

Глубины в данном районе не превосходили 14 м. Наиболее высокие значения температуры наблюдались вблизи устья р. Кемь. Они были связаны с распространением относительно теплых речных вод

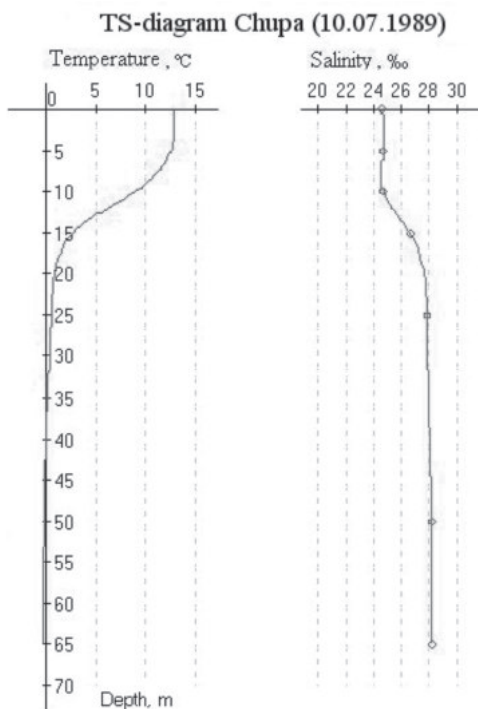


Рис. 3. Профили температуры и солености в Керетской губе в сентябре 2000 г.

и интенсивным прогревом мелководья. Распространение речных вод по акватории эстуария отразилось и на распределении солености. Наименьшие ее величины отмечались вблизи устья на поверхности воды и соответствовали 8,10/‰. С увеличением глубины она возрастала и достигала в придонных слоях 18–260/‰. На ряде станций в верхнем слое наблюдался резкий галоклин толщиной до 2,5 м. На открытой к морю акватории соленость в поверхностном слое воды возрастала до 26,20/‰, причем на некоторых станциях (ст. 1 к, 10 к–12 к) имела место обратная стратификация вод по солености, а сами различия между верхним и придонным слоем достигали 1,20/‰.

Формирование полей температуры и солености в Онежском заливе и их пространственно-временная изменчивость определяются природными условиями (морфометрическими особенностями

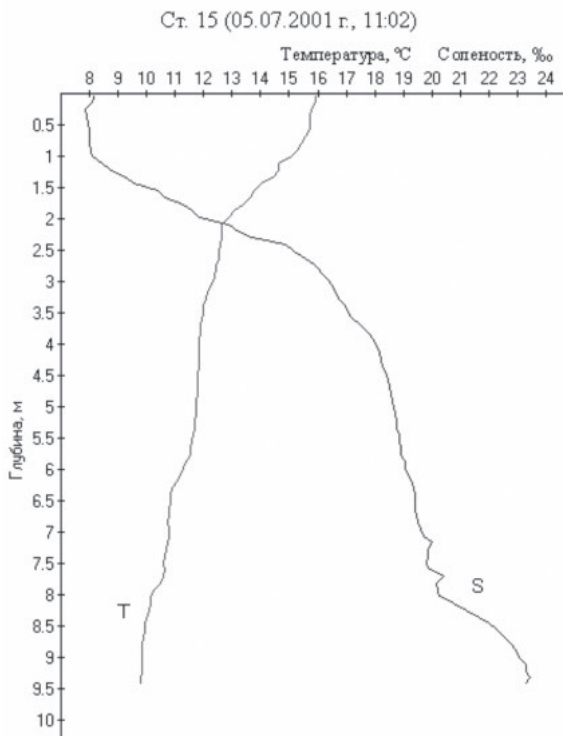


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры и солености в эстуарии р. Кемь (залива, динамикой вод, речным стоком, водообменом с Бассейном Белого моря). Под влиянием квазипостоянных течений осуществлялся перенос вод по акватории залива, а в результате сильных приливо-отливных течений и трансформации приливной волны на мелководье происходило интенсивное перемешивание вод. Если во второй декаде июля наблюдалась еще слабая стратификация вод, то уже в первой декаде сентября воды перемешаны практически до однородного состояния по вертикали. Сопоставление профилей температуры и солености на гидрологических станциях свидетельствует о том, что к югу от Соловецких островов расположены относительно однородные холодные воды. Их температура ниже, чем даже температура воды глубинных горизонтов в проливе Западная Соловецкая Салма. Это позволяет нам предположить, что основное поступление вод в Онежский залив происходит

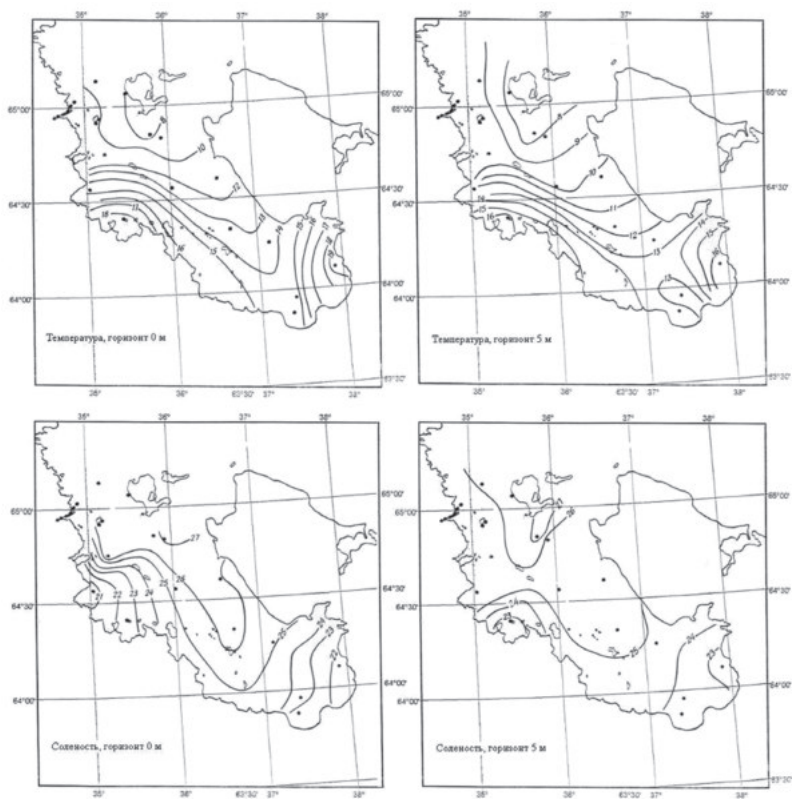


Рис.5. Карты распределения температуры воды и солёности в Онежском заливе Белого моря на горизонтах 0 и 5 м. 10–14 июля 2001 г.

дило через Восточную Соловецкую Салму, в отличие от принятой ранее схемы крупномасштабной циркуляции вод (Океанографические условия..., 1991).

Районам распространения речных вод соответствуют также пониженные значения в пространственном распределении солёности.

Были рассчитаны спектральные характеристики уровня моря и температуры воды. Их периодограммы свидетельствуют о том, что спектр колебаний уровня типичен для чисто приливного периодического процесса с одной доминирующей гармоникой на частоте, соответствующей периоду 12 часов, а периодограмма температурных колебаний выявляет доминирование 12-часовых флуктуаций

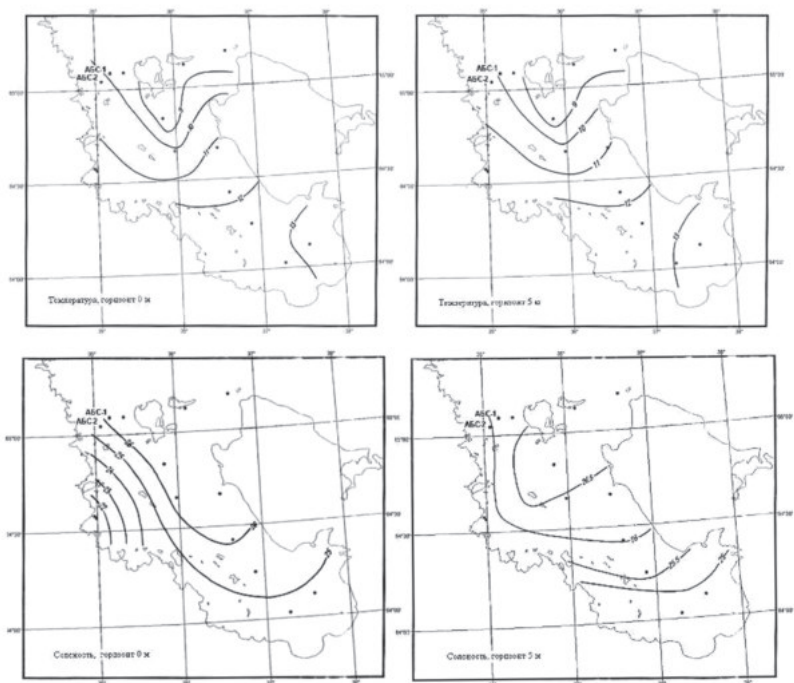


Рис. 6. Карты распределения температуры воды и солёности в Онежском заливе Белого моря на горизонтах 0 и 5 м. 02–06 сентября 2001 г.

при наличии еще нескольких гармоник с кратными частотами. Проявляется небольшой тренд в низкочастотной области.

Нами выполнен взаимный спектральный анализ выбранных временных рядов. На частоте полусуточного прилива когерентность составляет 0,80, а разность фаз – четверть приливного цикла, т.е. температурные внутриволновые изменения запаздывают по отношению к приливным колебаниям уровня. На других частотах нет статистической связи, так как в высокочастотной области (временные масштабы менее 12 часов) нет заметных периодических колебаний уровня.

Наблюдения за колебаниями уровня поверхности моря показывают, что наименьшие амплитуды (около 55 см) отмечаются на открытых акваториях, а в эстуарии р. Кемь они увеличиваются до 95 см (район Рабочееостровска). Наибольшие амплитуды колебаний уровня были зафиксированы в Керетской губе на станциях Б1 и Б2

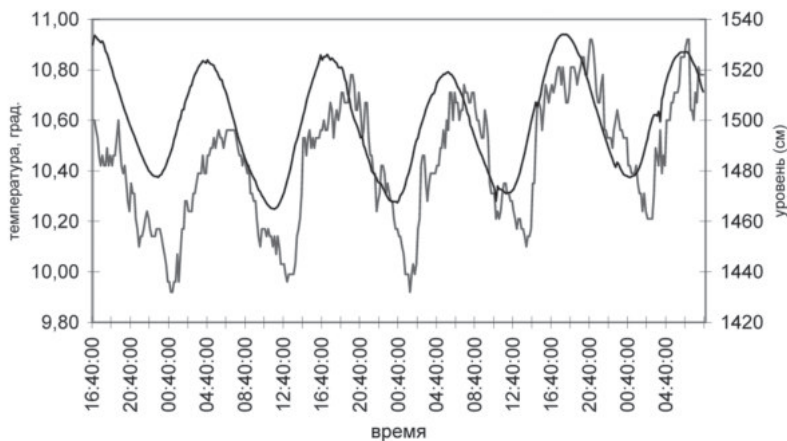


Рис. 7. Колебания урениной поверхности и температуры воды в придонном слое. 12–15 июля 2000 г. О-ва Кузова

(115 см). На станции Б1 приливо-отливные движения имеют правильный характер, время нарастания величины уровня поверхности моря равно времени его падения. На станции Б2 выявлено характерное для закрытых акваторий Белого моря неравенство в продолжительности приливных и отливных фаз. Все материалы измерений свидетельствуют о явном преобладании полусуточной приливной волны M2. Вместе с тем, заметна и суточная приливная волна S1, которая проявляется в изменении амплитуд полусуточных приливов и достигает 6 см на станции Б1 и 10 см на станции Б2 между последовательными приливо-отливными циклами. При средней высоте прилива 115 см суточная составляющая достигает 8,6%. Спектр колебаний уровня типичен для чисто приливного периодического процесса с одной доминирующей гармоникой на частоте, соответствующей периоду 12 часов с несколькими гармониками с кратными частотами.

На станции у островов Кузова эти колебания находятся в тесном соответствии, но с запаздыванием изменений температуры воды по фазе около 2 часов (рис. 7). В изменчивости температуры воды в придонном слое отмечаются кроме полусуточных еще ряд относительно мелкомасштабных флукутаций.

Изменчивость температуры на различных горизонтах в условиях стратификации вод свидетельствует о внутриволновых колебаниях

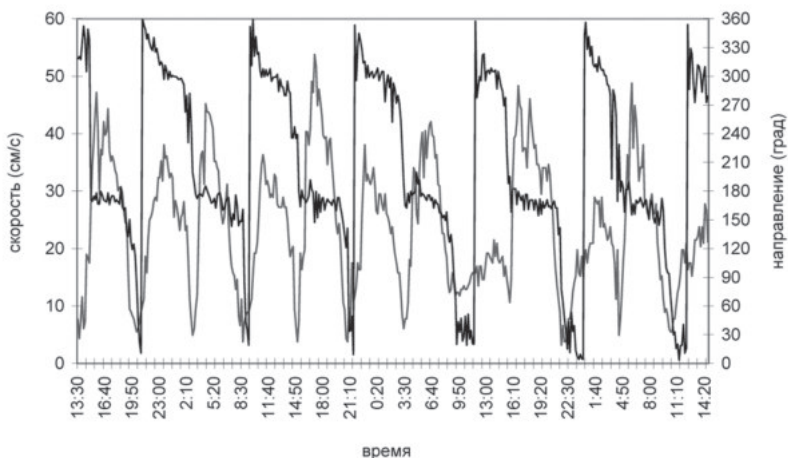


Рис. 8. Направления и скорости течений на АБС-1 4–7 июля 2001 г. Горизонт 8 м.

термоклина, соответствующих периоду полусуточных приливных движений. Наличие мелкомасштабных колебаний температуры может свидетельствовать о неустойчивости при сдвиге скорости течения в градиентном и придонном слоях. При достаточно больших амплитудах внутренних волн (до нескольких метров) наблюдается иногда резкое заглубление верхнего квазиоднородного слоя (ВКС). Наблюдения направлений и скоростей течений, выполненные на автономных буйковых станциях Б1 и Б2 в районе р. Кереть, свидетельствуют, что на относительно закрытой акватории (ст. Б2) скорости не превышали 5 см/с и, как правило, были равны 2–4 см/с (гор. 5 м). На станции Б1 они достигали 17 см/с. В Онежском заливе в районе островов Заецких максимальные скорости приливных течений составляли около 25 см/с (гор. 3 м) и достигали 75 см/с (гор. 3 м) у островов Кузова. Абсолютные значения скорости течения в эстуарии в период отлива были больше, чем при приливе. При смене разных фаз прилива направления течения изменялись достаточно резко (рис. 8).

Моделирование приливо-отливных течений

Путем гидродинамического моделирования был проведен ряд численных экспериментов по исследованию приливо-отливных течений, колебаний уровня и переноса условного загрязнителя в



Рис. 9. Концентрация примеси в вершине Онежского залива на 60 часов расчетного времени при расходе реки 2800 м³/с (а – обычный масштаб, б – логарифмический масштаб)

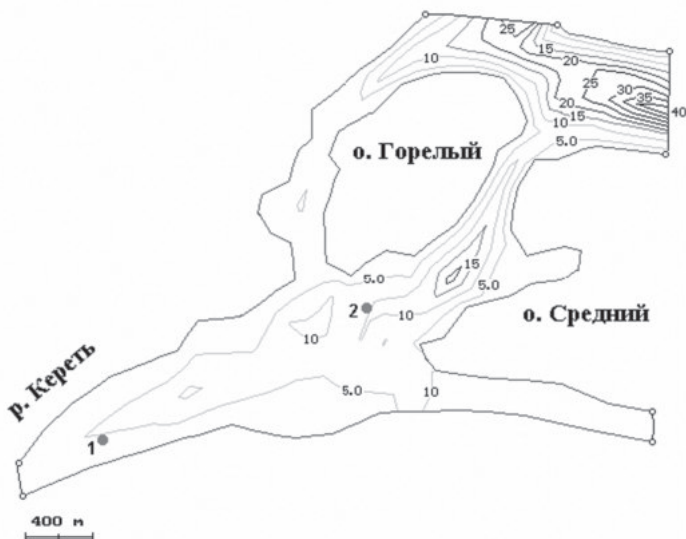


Рис. 10. Глубины в районе устья р. Кереть; 1 и 2 – места постановки мареографов.

Онежском заливе Белого моря и эстуариях рек Онега и Кереть. Результаты математического моделирования приливо-отливных течений, выполненного нами для данных районов моря, хорошо совпадают с материалами натурных измерений.

В результате численных экспериментов в устье Онеги были выявлены существенные нелинейные эффекты в приливных течениях и колебаниях уровня, выраженные в разности времени падения и роста уровня. Основной причиной этих нелинейностей оказалось действие донного трения (Здоровеннов и др., 2001). Кроме того, разница между средним уровнем и полной водой несколько превышала разницу между средним уровнем и малой водой, что свидетельствует о наличии в данных районах остаточной приливной циркуляции. Вследствие этого, распространение примеси в указанных районах, которое происходило под воздействием стока рек и приливных течений, не имело чисто реверсивного характера, и по мере продвижения условного загрязнителя от устья реки происходила его дальнейшая миграция под действием остаточных приливных течений (рис. 9). При этом на значительных расстояниях от устьев рек начинали образовываться пятна примеси с повышенной концентрацией.

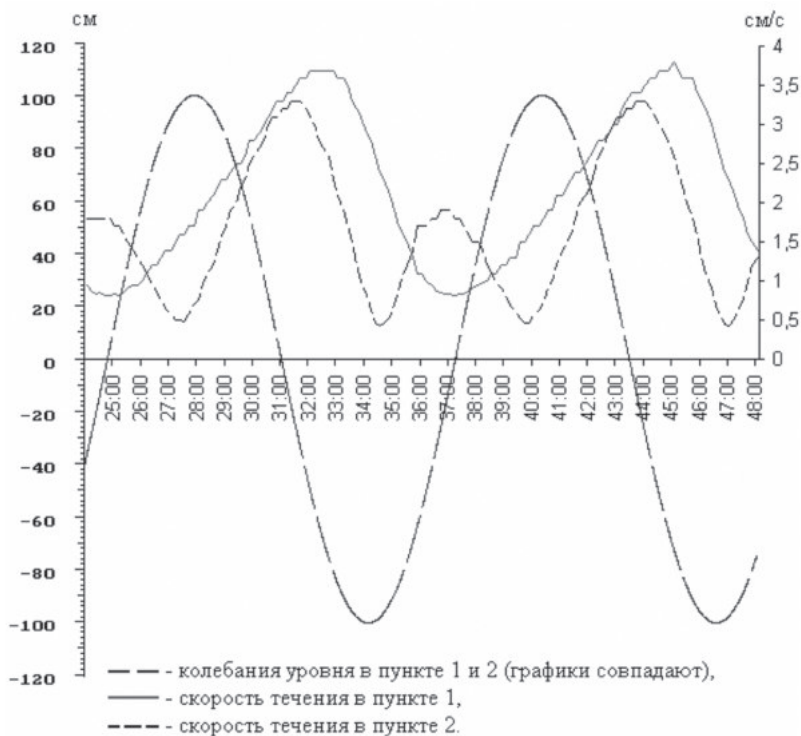


Рис. 11. Временной ход колебаний уровня и изменения скорости течения (амплитуда сизигийного прилива 100 см, расход реки – 23 м³/с)

Для района эстуария Керети оценивалось влияние различных расходов реки на приливные колебания уровня и течений при квадратном и сизигийном приливах. Численные эксперименты проводились для двух пунктов (рис.10). Во всех случаях на обеих станциях амплитуда приливных колебаний уровня полностью соответствовала амплитуде приливной волны M₂, задаваемой на открытой границе расчетной области.

Время падения уровня равнялось времени роста. Таким образом, никакого искажения приливных колебаний уровня во всех экспериментах не происходило. Несколько иная картина наблюдалась с приливными течениями. Распределения скорости и направления течения во времени имеют более сложный вид и не соответствуют чисто гармоническому характеру. Особенно это хорошо выражено на станции 1 в сизигийный прилив при среднем и минимальном

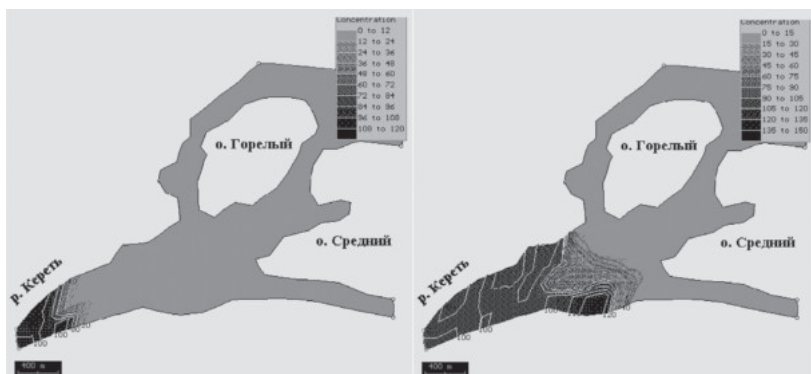


Рис. 12. Концентрация примеси (амплитуда сизигийного прилива 100 см, расход реки максимальный – 100 м³/с) для 26 ч расчетного времени (слева) и 36 ч (справа)

расходах реки (рис.11). Характерные рассчитанные скорости приливо-отливных течений для устья Керети находятся в хорошем соответствии с наблюдаемыми скоростями.

Для всех вариантов счета были получены ареалы распределения примеси. Их положение и размеры определялись приливо-отливными течениями и стоком реки (рис. 12). Результаты этих экспериментов сведены в табл. 3, из которой видно, что основную роль в переносе примеси играет речной сток.

Таблица 3

Расстояние, на которое распространился условный загрязнитель за 12 часов расчетного времени.

Амплитуда прилива \ Расход реки	100 м ³ /с	23 м ³ /с	9 м ³ /с
	100 см	2,5 км	1,2 км
50 см	2 км	1 км	0,6 км

Оценка особенностей полей температуры воды и концентрации хлорофилла-а.

Для изучения полей температуры воды и концентрации Хлф-а, РОВ были проведены синхронные съемки STD зондами SeaCat и Quanta, измерения температуры поверхности воды (ТПВ) ИК-радиометром с борта судна и со спутника НОАА, радиометром AVHRR с разрешением 1,1 км, а также флуориметром «Квант». Использование такого набора данных позволяет провести атмос-

ферную коррекцию, оценить влияние погодных условий на измерения ТПВ, выяснить влияние поверхностной пленки на поверхности моря на показания измерителей. Рассматривались проблемы калибровки и атмосферной коррекции спутниковых данных, оптимизации алгоритма вычисления температуры, определение критерия правильности вычисленной ТПВ. Для исследования распространения и концентрации хлорофилла-а применялись данные высокого разрешения 1,1 км со спутника SeaWiFS (Johannessen, Laskovski, Pozdnyakov et al. 2002).

Анализ ИК-изображений показал, что поле температуры поверхности Белого моря имеет существенную пространственную изменчивость и может значительным образом отличаться от климатического. Выявлено наличие струйных течений многочисленных вихревых образований циклонического и антициклонического характера, когерентных структур типа «грибовидные образования», а также неоднородностей, связанных с генерацией экмановских прибрежных апвеллингов (рис. 13). Фронты в эстуариях и у Соловецких островов испытывают динамическую неустойчивость, проявляющуюся в виде струй («пальцев»), вторгающихся в воды бассейна. Проведенный анализ спутниковых изображений в видимом и ИК-диапазонах позволяет сделать вывод о большом разнообразии форм движений вод в эстуариях, заливах Белого моря от крупномасштабной циркуляции до различного рода нестационарных структур мезо- и синоптического масштабов. Механизмом формирования описанных структур может быть замедление струйного течения, возникающего первоначально под влиянием достаточно мощного локального импульса. Такой импульс может создаваться различными факторами, в прибрежных районах – стоками рек в сочетании с ветром, влиянием орोगрафии и общим направлением прибрежной циркуляции.

Анализ подспутниковых данных показал тесную связь между температурой, соленостью воды и интенсивностью флуоресценции РОВ в воде. При этом связь этих параметров с концентрацией хлорофилла значительно сложнее. Можно отметить, что не наблюдается плавного изменения параметров: после полной воды, когда среднее значение солености снижается не постепенно, имеют место резкие колебания этого параметра (до 4‰), и в некоторый момент происходит резкий спад солености (на 12‰). В морской более соле-

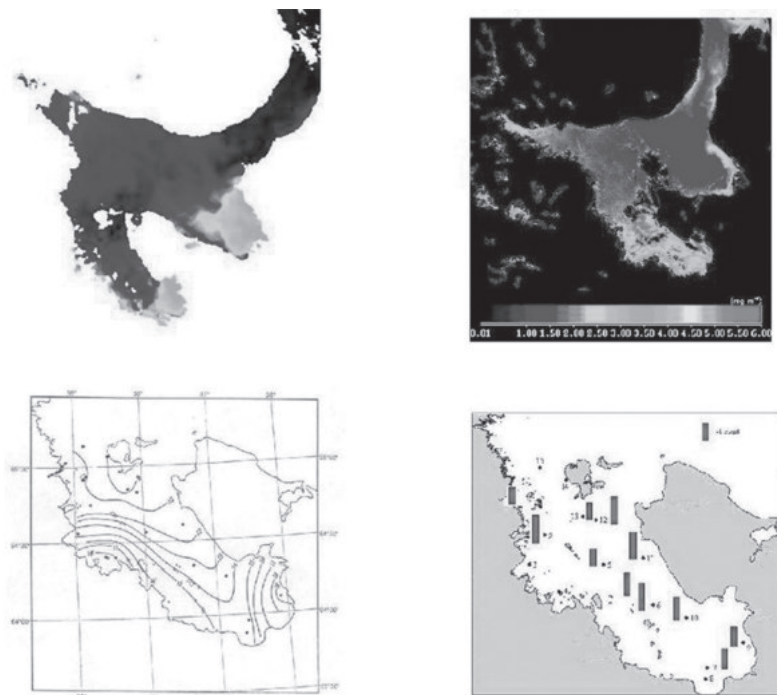


Рис. 13. Распределение температуры воды на поверхности моря 10 июня 2001 г. по данным NOAA и измеренные с НИС «Эколог», распределение хлорофилла-а по данным со спутника SeaWifs и по результатам измерений с борта НИС «Эколог»

ной воде цветение менее интенсивно, и концентрация хлорофилла понижена. Анализ показывает, что концентрация Хлф-а имеет различную связь с температурой воды и флуоресценцией. Кроме того, отмечается вторичный скачок (резкое изменение параметров) после наступления малой воды, что также подтверждает существование резких границ между двумя водными массами. Таким образом, можно утверждать, что для поверхностного слоя воды в устье реки Кемь зона смешения не является непрерывной. Напротив, существуют разделенные резкой границей, по крайней мере, две водные массы, которые перемещаются приливно-отливными течениями из моря в реку и обратно, что показывает наличие так называемой барьерной зоны. Отмечается пятнистый характер распределения хлорофилла в воде, и концентрация хлорофилла меняется в основном от 1 до 2–2,5 мкг/л, хотя иногда и превышает 3,0 мкг/л.

Даже такой краткий анализ распределения хлорофилла в приповерхностном слое Онежского залива приводит к выводу о том, что при необходимости получения информации о динамике этого сильно изменчивого параметра следует использовать методы непрерывной регистрации. Иначе получаемые данные будут малопредставительными и вряд ли позволят корректно интерпретировать, например, космические снимки, так как даже при хорошем разрешении этих снимков изменчивость полей хлорофилла такова, что измерение концентрации хлорофилла в одной точке очень часто дает слабое представление о среднем значении этого параметра на участке размером в несколько сот метров и более.

Для исследования Хлф-а, РОВ, минеральной взвеси мы ориентировались на спектральные каналы сенсора SeaWiFS для регистрации яркости водной поверхности в видимом диапазоне спектра: 412, 443, 490, 555 и 670 нм. Сравнение показывает определенную связь между мезомасштабными динамическими структурами и концентрацией хлорофилла «а» (рис. 13).

На рис. 13 представлены распределение ТПВ, полученных со спутника в июле, и концентрация хлорофилла-а, рассчитанная по данным спутниковых измерений и наблюдений с НИС. Для оценок использовались алгоритмы SeaDAS и Levenberg-Marquardt (частное сообщение, работа Д.В.Позднякова, январь 2002 г.). Однако, как оказалось, наиболее приемлемым для условий Белого моря оказался алгоритм Левенберга-Маргарта (Johannessen, Laskovski, Pozdnyakov et al. 2002).

Заключение

В настоящей работе был выполнен комплекс контактных и дистанционных наблюдений в разнообразных районах моря, эстуариях рек Кереть, Кемь, Онежском заливе и в районе Соловецких островов, который позволил выявить некоторые закономерности пространственно-временной изменчивости наиболее важных океанологических характеристик, отражающих состояние экосистемы Белого моря. Показано, что мезомасштабные процессы доминируют в формировании внутреннего и внешнего водообмена моря, определяют особенности распределения химико-биологических характеристик акваторий и функционирования его экосистемы. При этом

наибольший вклад в формирование полей скорости и плотности в Белом море вносят полусуточные приливные движения. Именно они вносят наибольший вклад в перераспределение взвешенного вещества, загрязнений между прибрежными и открытыми частями моря. Взаимодействие пресноводного стока и морских вод приводит к формированию фронтальных зон, барьерным эффектам, своеобразию термогидродинамического и химико-биологического режимов. Были проведены численные эксперименты по исследованию приливо-отливных течений, колебаний уровня и переноса взвесей в эстуариях р. Кереть и Онега, которые выявили роль нелинейных эффектов в приливных течениях и колебаниях уровня, выраженных в разности времени падения и роста уровня. Для внедрения современных методов оценки качества вод по таким параметрам, как концентрация хлорофилла-а, растворенной органики и минеральной взвеси, были выполнены контактные и спутниковые измерения растворенного органического вещества (РОВ), минеральной взвеси (МВ) и Хлф-а, температуры воды. Использование такого подхода дало возможность провести атмосферную коррекцию, оценить влияние погодных условий на измерения ТПВ, выяснить влияние поверхностной пленки на поверхности моря на показания измерителей. Для исследования распространения и концентрации хлорофилла-а применялись данные высокого разрешения 1,1 км со спутника SeaWiifs.

Анализ подспутниковых данных показал тесную связь между температурой, соленостью воды и интенсивностью флуоресценции РОВ в воде. Доказана необходимость получения информации о распределении сильно изменчивого параметра (концентрации хлорофилла-а в воде) в режиме непрерывной регистрации. В данной работе обобщены основные результаты исследований Белого моря, выполнявшихся Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН в рамках фундаментальных научных направлений Отделения океанологии, физики атмосферы и географии РАН, а также по грантам РФФИ №00-05-79063, ИНКО-Коперникус №ICA2-1999-10167 и ФЦП «Интеграция» с участием ведущих специалистов ряда других академических учреждений и МГУ. Авторы благодарят всех участников полевых исследований и в первую очередь член-корр. РАН Ю.С. Долотова, благодаря которому удалось получить возможность выполнить

работы по гранту, А.В.Митрохова, капитана и команду НИС «Эколог», профессора Д.В.Позднякова, А.Н.Филатова, А.А.Коросова, А.В.Шавыкина, А.В.Толстикова за большую помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bukata R.P., Pozdnyakov D.V., Jerome J. H, and Tanis F. J. Validation of a radiometric color model applicable to optically complex water bodies. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 77, 165–172.
2. *Limnology and Remote sensing*. Ed. By K.Kondratyev, N.Filatov. Springer-Praxis. London. 1999. 412 p.
3. Здорвеннов Р.Э., Лифшиц В.Х., Фукс В.Р. Приливные движения и перенос примеси в эстуарии реки Онеги. *Океанология*. 2001, том 41. №5, с. 680–685.
4. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. 2. Белое море. Л. Гидрометеиздат. 1991, 351 с.
5. O.M. Johannessen, A. Liaskovski, D. Pozdnyakov, N. Filatov, L. Pettersson, L. Bobylev. SeaWiFS detects spatial features of the White Sea water quality parameters. In *Intern. Jornal of Remote Sensisng*. In press.

Дунин-Барковский Лев Валерианович

(20.2.1912 – 16.8.1977)

Лев Валерианович Дунин-Барковский – крупный учёный, гидротехник, известный специалист в области мелиорации, комплексного использования водных ресурсов, применения математических методов и средств вычислительной техники в водном хозяйстве, строительства мелиоративных и других гидротехнических сооружений; доктор географических наук, профессор, «Заслуженный ирригатор Узбекской ССР», лауреат Государственной премии СССР в области техники; заместитель директора Института водных проблем АН СССР.



Л.В. Дунин-Барковский родился 20 февраля 1912 г. в г. Ташкент. После окончания среднего учебного заведения в 1928 г. поступил на инженерно-мелиоративный факультет Среднеазиатского государственного университета, реорганизованного в 1931 г. в Среднеазиатский институт инженеров водного хозяйства. В том же году окончил Отделение гидротехнических сооружений этого Института, получив квалификацию инженера-строителя по гидротехнической специальности.

В 1931–51 г. Лев Валерианович работал в водохозяйственных организациях Среднеазиатских республик, участвовал в изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации оросительных систем и сооружений. В 1951 г. был переведён в г. Москву, где до 1961 г. работал главным инженером в проектных организациях Минстроя, Министерства мелиорации и сельского хозяйства.

В 1955 г. Л.В. Дунин-Барковский защитил кандидатскую диссертацию «Совместное комплексное использование водных ресурсов рек Средней Азии». В 1961 г. он перешёл во Всесоюзный НИИ гид-

ротехники и мелиорации им. А.Н. Костюкова на должность заместителя директора по научной работе и зав. отделом комплексного использования водных ресурсов. В октябре 1962 г. защитил докторскую диссертацию «Физико-географические основы проектирования оросительных систем» и получил учёную степень доктора географических наук. В 1969 г. ему было присвоено звание профессора по специальности «Инженерная гидрология».

Л.В. Дунин-Барковский участвовал в строительстве Большого Ферганского канала, водохранилища Кую-Мазар; был главным инженером проекта (и инициатором работ) противоселевой плотины в Медео (для защиты г. Алма-Аты), где впервые применялся разработанный Львом Валериановичем метод направленного взрыва. Награждён Государственной премией СССР за 1971 г. в области техники за сооружение каменно-набросной плотины Байпазинского гидроузла на реке Вахш массовыми направленными взрывами «на сброс».

Принимал участие в проектировании Высотной Асуанской плотины (р. Нил, Египет); работал главным инженером строительства канала Тартар-Евфрат в Ираке.

В 1973 г. после возвращения из командировки в Ирак был направлен Министерством мелиорации и водного хозяйства СССР в распоряжение Академии наук СССР и утверждён в должности заместителя директора Института водных проблем Академии наук СССР, где проработал до конца жизни.

В числе наиболее значимых работ Л.В. Дунина-Барковского можно отметить следующие: Применение современной вычислительной техники при водохозяйственном проектировании / Гидротехника и мелиорация, №3, 1963 г.; Водные ресурсы пустынных районов СССР (в соавторстве с Геллером С.Ю., Нечаевой Н.Т.) / Известия АН СССР. №1, 1965 г.; Автоматизированная система управления в водном хозяйстве (в составе авторского коллектива) / Гидротехника и мелиорация. №8, 1969 г.; Методика расчёта оптимального режима управления Сырдарьинским ирригационно-энергетическим комплексом (в соавторстве с Ю.А. Архангельскими и сотрудниками ВНИИГиМ М.З. Борщевским, Л.С. Гофштейн и др.) / Водные ресурсы. №1, 1975 г.; Изучение водных ресурсов с помощью космических средств в США / Водные ресурсы». №1, 1976 г. В статье подробно обсуждались

проблемы использования дистанционных наблюдений, включая аэрокосмические, для изучения водных ресурсов, что на тот период являлось перспективными и значимыми исследованиями.

В 1976 г. в издательстве «Наука» вышла монография Л.В. Дунина-Барковского: «Физико-географические основы ирригации», в которой рассматриваются теоретические основы физико-географического районирования и приводятся конкретные примеры отечественных и зарубежных ирригационных систем, иллюстрирующие использование районирования для организации орошения в различных районах. В этой работе предложена также методика проведения анализа теплового и водного баланса.

Л.В. Дунин-Барковский – автор более 100 научных публикаций, в числе которых статьи в журналах и сборниках трудов, методические и технические указания по проектированию каналов оросительных систем, труды по гидрологии суши и комплексному использованию водных ресурсов. Результаты его фундаментальных исследований нашли широкое практическое применение и эффективно используются в нашей стране и за рубежом.

М.И. Степанова (ИВП РАН),

Р.И. Бедная (ИВП РАН)

Залетаев Владимир Сергеевич

(12.2.1929 – 22.10.1998)



Владимир Сергеевич Залетаев – крупный учёный-естествоиспытатель, специалист в области динамики наземных экосистем в условиях нестабильного водного режима аридных территорий, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии естественных наук, академик Российской экологической академии, Заслуженный деятель науки Российской Федерации РФ.

В.С. Залетаев родился 12 февраля 1929 г. в г. Вольске. После окончания школы с золотой медалью в 1948 г. поступил на биолого-почвенный факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. В 1953 г. окончил обучение и был рекомендован в аспирантуру Института географии АН СССР (отдел биогеографии).

Любовь к природе проявилась в нём с детства: он родился и провёл детство и отрочество на Волге. Этот интерес стал профессиональным после обучения в университете; его учителями были прекрасные учёные. Дипломная работа о рыбоядных птицах Западного Прикаспия была написана под руководством крупного специалиста-орнитолога, профессора Н.А. Гладкова. Продолжением работ в этой области стала кандидатская диссертация «Экология и география птиц Прикаспийских пустынь», выполненная в Институте географии АН СССР под руководством профессора С.В. Кирикова.

Период наивысшей творческой зрелости В.С. Залетаева и общественного признания пришёлся на время работы в Институте водных проблем АН СССР, в котором он начал работать в 1976 г. в должности старшего научного сотрудника, а с 1987 г. – ведущего научного сотрудника и руководителя группы экологии суши. Успешно выпол-

ненные исследования экологических последствий водохозяйственного строительства позволили ему установить фундаментальные закономерности развития и динамики наземных экосистем в условиях трансформации водного режима аридных территорий.

Эти работы послужили Владимиру Сергеевичу основой для создания теории экологически дестабилизированной среды, как особой фазы развития биосферы Земли, и успешно защитил в 1988 г. докторскую диссертацию на тему «Географические закономерности структурной организации и динамики экосистем аридных зон (равнины Средней Азии и Казахстана). В этом же году ему было присвоено учёное звание профессора по специальности «Биогеография и география почв».

В 1989 г. В.С. Залетаев возглавил Лабораторию динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора.

Научная деятельность В.С. Залетаева в учреждениях АН СССР и в Институте водных проблем РАН продолжалась свыше 40 лет и была на редкость продуктивной. Им создана школа по изучению динамики экосистем в условиях нестабильного гидрологического режима, опубликовано более 300 работ, в том числе 7 монографий. Под его руководством было защищено более 20 кандидатских и 2 докторские диссертации.

Больших успехов В.С. Залетаев достиг в области развития теории экотонов. Им были выявлены основные принципы структурно-функциональной организации экотонов, обеспечивающей устойчивое развитие экосистем, разработана классификация экотонов и показан полисферный многоуровневый характер экотонных систем; описана мировая сеть экотонов, географические закономерности её пространственной организации и охарактеризована важная роль экотонов вода–суша в поддержании биосферных процессов.

Научные достижения В.С. Залетаева получили должное признание. Он удостоен почётного звания «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (1998 г.), неоднократно награждался почётными грамотами Президиума АН СССР, почётным дипломом Российской академии естественных наук «За фундаментальный вклад в развитие географической экологии» и медалью имени академика П.Л. Капицы «За научное открытие» (1994 г.); Дипломом Международного научного фонда «За исследования проблемы биоразнооб-

разия» (1994 г.); Грамотой и почётным знаком Российской академии естественных наук «За достижения в развитии российской науки и экономики» (1996 г.).

Владимир Сергеевич был бесконечно предан науке, исследованиям, обладал энциклопедическими знаниями о природе пустынь, культуре, истории населяющих их народов. Он был прирождённым путешественником и талантливым учёным, организатором исследований пустынь и засушливых областей мира. Под его руководством экспедиционные работы проводились в Средней Азии, Монголии, Калмыкии, Северном Прикаспии, Германии, на юге Франции.

Широта его интересов и многообразие занятий Владимира Сергеевича не мешали ему завершать каждое новое исследование монографическим обобщением. Так, первые его шаги в науке отмечены выходом в свет монографии «Природная среда и птицы северных пустынь Закаспия» (Наука, 1968). Исследования, проведенные в Средней Азии – монографией «Жизнь в пустыне» (Мысль, 1976). Затем вышло в свет историко-этнографическое исследование, ставшее библиографической редкостью «Древние и современные дороги Туркмении» и ряд небольших книг о влиянии водохозяйственной деятельности на природу пустынь. Монография «Экологически дестабилизированная среда – экосистемы аридных зон в изменяющемся гидрологическом режиме» (Наука, 1989) является крупным обобщением, поднявшимся до уровня теории. Последней его книгой стал поэтический сборник «Побережье» (1998), включивший более 400 стихотворений, написанных в течение жизни. Это поэтическое философское размышление о жизни и зарисовки ярких для него страниц имели большое значение для Владимира Сергеевича. Он создавал сборник очень бережно и с нетерпением ожидал его выхода, будучи уже неизлечимо больным.

Владимир Сергеевич отличался необыкновенной активностью жизненной позиции, неподдельным интересом к людям и их судьбам.

Кончина застала Владимира Сергеевича в полном расцвете творческой деятельности. Много было сделано, как главная память о нём остались ученики, научно-исследовательская Лаборатория с активным творческим коллективом и планы восьми монографий о природных процессах, этнографии, культуре и т.д.

Н.М. Новикова (ИВП РАН)

Структурная организация экотонов в контексте управления¹

В.С. Залетаев

Природная среда и актуальные процессы, происходящие в ней, исследуются с различных позиций, однако генеральной целью всегда остается познание организации экосистемного (биогеоценотического) покрова Земли, его функционального единства и его роли в поддержании гомеостаза биосферы. Много сделано для этого в области изучения экологии зональных экосистем различных природных зон Земли.

Экотоны – переходные граничные пространства между различными природными системами (экосистемами, ландшафтами), между природными и антропогенными системами, между различными средами («вода-суша») и между различными природными зонами, – оказались значительно менее исследованными. Вместе с тем распространенность экотонов в природе огромна, а роль весьма значительна.

Эти переходные пространства имеют специфическую структуру и служат местом формирования и сохранения биологического разнообразия. На экотонных территориях формируются экотонные биотические сообщества и экотонные системы. Они обладают особым составом, структурой и механизмами устойчивости, отличающимися от таковых в зональных экосистемах. Повышенная флуктуационная активность факторов среды представляет собой одну из главных особенностей экотонных территорий и акваторий, что определяет специфическую структуру, режим функционирования, механизмы устойчивости и условия развития экотонных систем. Экотоны определяют возможность континуальности биогеоценотического покрова, осуществляя функцию соединения, собственно, они играют функцию «швов» между различными природными или агро-техноприродными системами и, одновременно, исполняют роль природных мембран и буферную функцию, а также функцию рефугиумов для ряда видов организмов.

Кроме того, повышенная активность экологических и географических процессов на переходных территориях обеспечивает экото-

¹ Залетаев В.С. Структурная организация экотонов в контексте управления. С. 11–29 // в кн. Экотоны в биосфере / Под ред. д.г.н. В.С. Залетаева. М.: РАСХН, 1997. 329 с.

нам особо важную роль в эволюционном процессе, в особо быстротекущем процессе адаптациогенеза организмов, развитии спонтанной гибридизации и симпатрическом формообразовании.

Экотоны – узел экологических проблем.

В организации биосферы два противоположных начала – непрерывность и дискретность явлений – соединены в единую динамическую систему. Процесс эволюции систем природных в направлении создания и совершенствования структурно-функционального порядка прерывается периодами разрушения систем организации, формированием диссипативных структур и затем созданием новых, относительно устойчивых структур, вырастающих из состояния временной деструктурированности.

В настоящее время в результате деятельности человечества резко возрастает дробность и контрастность биогеоценотического и ландшафтного покровов.

Возникают множественные нарушения биогеоценотического континуума и, как следствие, появляются антропогенные и природно-антропогенные границы и формируются новые пограничные экотонные биотические сообщества и экотонные системы. Наблюдения во многих природных зонах показывают, что процесс возникновения новых экотонов различного уровня сложности организации быстро прогрессирует. Например, на аридных территориях Средней Азии и Казахстана экотоны занимают уже около трети площади региона (70–80 млн га). Этот процесс получил название «эко-tonизации биогеоценотического (экосистемного) и ландшафтного покровов» [1, 2]. Сохранение этой тенденции образования новых экотонов позволяет предположить, что природная среда планеты в будущем – это сфера господства экотонов. Именно поэтому столь важна проблема изучения экотонов, их организации, динамики, закономерностей развития (включая формирование и деградацию), их типологии, и возможности контролировать процесс экотонизации и управлять развитием и динамикой экотонных систем.

Прежде чем рассмотреть проблему динамики и развития экотонов в связи с особенностями их структурной организации, необходимо выявить основные типы экотонов. С одной стороны, – это проблема пространственной организации территории, на которой рас-

пространен комплекс экотонных сообществ, с другой, – это проблема анализа самих природных или природно-антропогенных экотонных биотических сообществ или экотонных систем, существующих на этих переходных территориях.

Попутно необходимо отметить, что уточнение основных понятий и идентификация терминов является одной из частных, но необходимых задач.

Особый предмет исследования составляет анализ свойств экотоннов. Мембранные, буферные, контактные свойства экотонных систем по-разному реализуются при разных типах их структурной организации, что, соответственно, требует дифференцированных типов управления.

Экотоны – это не только границы или «швы»-соединения, но и русла геохимических и энергетических потоков, и каналы расселения организмов. Эти процессы экологически активны, несут с собой потенциальную угрозу глубоких и быстрых трансформаций природных систем, и потому должны тщательно контролироваться. В связи с этим целесообразна организация специальной службы «мониторинга экотоннов».

Пространственные и генетические типы экотоннов.

В первичном понимании по Ф. Клементсу [3] экотоны представляют собой контактные «микрзоны» между растительными сообществами или соседними экосистемами. Они отличаются выраженным краевым эффектом – повышенной численностью организмов и проявлением пертиненции в виде разнообразных влияний сообществ организмов на физическое состояние среды собственного и соседних сообществ [4]. Они не образуют самостоятельных элементарных экосистем и являются объектом фитоценологического изучения.

Понятие «экотон» применялось В.Б. Сочавой [5] для обозначения буферного сообщества (например, амурской подтайги), а позже определялось как «переходная полоса между двумя регионами или двумя выделами геомеров» с замечанием, что понятие уместно в учении о геосистемах [6]. Г. Вальтер и Е. Бокс [7] ввели понятие «зональный экотон», обозначая им переходное состояние растительности целой природной зоны, которое характеризуется смеше-

нием элементов двух различных формаций либо равномерным, либо в форме макромозаичного покрова. Термин «зональный экотон», по нашему мнению, вполне применим в «зоогеографии» для обозначения совмещения элементов разных фаунистических комплексов. Однако наряду с исследованием экотонов как специфических переходных пространств разных рангов и масштабов, чрезвычайный интерес представляют исследования организации и функционального своеобразия особых лабильных экотонных систем на переходных экотонных территориях. Одной из важнейших характеристик переходных территорий оказывается повышенная флуктуационность, неустойчивость параметров абиотической среды. Именно к этому ее свойству должны быть адаптированы экотонные системы.

Экотонные системы, в отличие от экотонов Ф. Клементса, представляют собой сложившиеся целостные элементарные экосистемы, обладающие географической специфичностью организации, занимают географически выделяемые территории и в этом смысле могут рассматриваться как географическое явление и объект биогеографического и геоэкологического изучения. В отличие от зональных экосистем мы называем лабильные экосистемы переходных территорий географическими экотонами или геоэкотонами [1, 2, 8, 9].

Структурно-функциональная организация древних, эволюционно сложившихся экотонных систем

Исследованиями в аридных и семиаридных зонах были выявлены два основных принципа структурно-функциональной организации экотонных систем, обеспечивающих их устойчивое функционирование в переменных флуктуирующих условиях среды [2, 10]. Различия типов организации экотонных систем в значительной степени связаны с геологическим возрастом переходной территории и возможностью формирования на относительно древних экотонах эволюционным путем группировок из близких организмов, способных поочередно осуществлять сходную или идентичную биогеоэкологическую функцию.

Примером древней экотонной системы может служить элементарная экосистема, включающая сообщество, состоящее из трех видов пустынных осок подрода *Vignea*, копытных (в том числе и овец) и грызунов. Совместное обитание трех близких видов осок: осоки

толстолобиковой (*Carex pachystylis*), осоки почти вздутой (*Carex subphysodes*) и вздутой (*Carex physodes*) оказывается возможным, поскольку корневища каждого вида располагаются на разной, но всегда определенной, характерной для данного вида глубине; у осоки толстолобиковой – на глубине 2–4 см, у осоки почти вздутой – на глубине 5–67 см, а у вздутой – 10–13 и даже 17 см [11, 12]. В разные годы плотность поверхности почвы при флуктуации условий изменяется от состояния корки до разбитых песков, и, в связи с этим, в разные годы аспирирует лишь один из видов, а именно тот, потребности которого в наибольшей степени соответствуют конкретные условия года. В почве при этом обнаруживаются ярусы живых дернин всех этих видов осок. При изменении степени рыхлости поверхностного слоя почвы происходит смена доминирующего вида, то есть функциональное замещение – субституция одного вида другим в разные годы, соответственно тому, условия которого из них в большей степени соответствуют биологическим потребностям и экологической специализации одного из видов осок. Таким образом, близкие виды в сообществе, выступая как «экологическая сумма видов», каждый из которых обладает своими специфическими тонкими адаптациями к среде обитания, что для сообщества в целом создает адаптационный спектр, существенно превышающий диапазон экологической лабильности каждого вида в отдельности. Оригинальность смен видов-доминантов регламентируется самой структурой сообщества.

Тип организации биогеоценотической структуры, когда ее составляют (в основе) два-три или более близких видов, выступающих как экологическая сумма видов, когда наблюдается прерывистое осуществление каждым из видов его основной биогеоценотической функции на основе функциональной субституции одного вида другим, более адаптированным к изменившимся параметрам среды, когда происходит закономерное чередование определенных фазовых состояний биогеоценоза, допускающее возврат к исходному состоянию, мы называем «субституционным типом структуры». Именно осуществление принципа субституции одного основного вида-функционера другим обеспечивает устойчивость такой экотонной системы в изменяющихся по годам условиях природной среды.

Этот биогеоценотический механизм создает эффект как бы «тонкой настройки» всей экосистемы к изменяющейся «тональности» ведущего фактора среды не за счет мобилизации индивидуальных адаптационных реакций организмов, а путем поочередного выдвигания сообществом разных, наиболее подходящих моменту, видов-функционеров для осуществления ими определенной биогеоценотической роли. Становление этого оригинального достаточно древнего механизма устойчивости геоекотонной системы связано с географической обусловленностью адаптогенеза организмов, прошедшего путем симпатрического формообразования. В популяциях, существующих на географических экотонах, более активны дивергентные процессы, о чем свидетельствует наблюдавшаяся спонтанная гибридизация. Следовательно, семенной материал в популяциях, существующих на экотонных территориях, более ценен для селекции [10].

Другой тип географически детерминированной геоекотонной системы, приспособленной к флуктуационному режиму природной среды, формировался в условиях Северного Прикаспия, в Тургайской ложбине и Северном Приаралье. Гетерогенная элементарная экосистема здесь включает несколько парцелл, которые при разных фазах флуктуации условий увлажнения обнаруживают способность расширять площадь основной парцеллы за счет другой, изменяя при смене фазы флуктуации условий увлажнения, обнаруживают способность расширять площадь одной парцеллы за счет другой, изменяя при смене фазы флуктуации направление развития биоценоза то в сторону опустынивания, то – остепнения. В схеме структуры экотонной системы комплексной суббореальной полупустыни выделяются три взаимодействующие парцеллы: 1) сообщество *Artemisia pauciflora*–*Camphorosma monspeliacum*–*Kochia prostrata* (прунжиково-камфоросмово-чернополынное сообщество), отражающее сходство с пустынным типом пространственного распределения организмов (проективное покрытие растительности 10–20%, объем фитопродукции в сухом весе от 2,0 до 6,6 ц/га в разные по увлажнению годы), 2) разнотравно-злаково-сообщество (*Agropyron*+*Stipa*), иногда с участием кустарников – таволг (*Spiraea*) – зверобойной и гордчатой, имеющее степной и лугово-степной облик (проективное покрытие 30–60–90%, объем фитопродукции от 6,0 в сухие годы, до 33,6 ц/га во влажные), и 3) смешанное злаково-раз-

нотравно – кустарниковые сообщества переходного «полупустынного» характера (проективное покрытие 20–40%, объем фитопродукции – 4,5–15,4 ц/га. Организующим агентом в формировании пространственной схемы структурной организации элементарной экосистемы полупустыни служит роющая деятельность малого суслика. На фоне разных в разные годы условий увлажнения одна и та же механическая деятельность животных-землероев то содействует развитию промывных процессов в почве, остепнению в растительном покрове и возникновению пятен олуговения в понижениях, то, напротив, в сухие периоды приводит к установлению непромывного режима почвенных процессов, сопровождающихся засолением, что усугубляет явления опустынивания [2, 13, 14]. Устойчивость экотонной системы осуществляется путем внутризкосистемных боковых сдвигов границ парцелл, когда одна расширяется за счет другой, а при ином увлажнении – сжимается. При этом в рефугиумах переживают неблагоприятный период то степные, то пустынные группировки видов. Этот тип структурной организации геоэкотонной системы назван нами «флуктуационным» с обратимыми периодическими латеральными сдвигами парцеллярных границ [2].

Экотоны и экотонные системы

Под термином «экотон» мы обычно подразумеваем и переходную территорию или даже трехмерное пространство (как в случае с экотоном «подземные воды/поверхностные воды») и, вместе с тем, имеем в виду саму природную систему, существующую в этом пространстве. Однако, экотонная система представляет собой предмет специального исследования, включающего не только анализ особенностей переходной территории, а более всего имеющего целью установление закономерностей биогеоценотических взаимосвязей внутри системы, определяющих ее функциональную целостность, тип организации и механизмы устойчивости.

По особенностям структурной организации экотонные системы принципиально отличаются от зональных экосистем, поскольку стратегия жизни биотических комплексов экотонов должна обеспечивать экотонной системе устойчивое существование в неустойчивой среде, характеризующейся, как правило, повышенной частотой и широким диапазоном флуктуаций ее показателей.

Поэтому следует четко различать понятия «структура экотонной территории (пространства)» и «структура экотонной системы» (хотя последняя имеет также пространственное выражение).

Так, территориальная структура экотона маргинальных участков оазисов или ирригационных районов обычно представлена контрастным чередованием заросших рудеральной растительностью участков и оголенных засоляющихся территорий, полос заброшенных полей на землях древнего орошения, где почва постепенно рассоляется, и на этой территории могут встречаться мозаично разбросанные фрагменты естественного экосистемного покрова в виде «островов» зональных экосистем и «островов» современных полей с агросистемами. Здесь же располагаются водоемы-накопители дренажных засоленных вод. Таким образом, пространственная структура гетерогенной экотонной территории показывает картину взаиморасположения различных биотических сообществ и экосистем как зональных, так и разных экотонных.

Структура же экотонных сообществ и экотонных систем на той же территории отражает схему взаимодействия составляющих сообщества организмов и схему функциональных взаимосвязей компонентов экотонной экосистемы. Главным предметом ее анализа является установление облигатных функциональных связей, обеспечивающих целостность системы как природного объекта, ее устойчивость, саморегуляцию и возобновимость [2, 10].

Следует заметить, что молодое биотическое сообщество экотонного характера, состоящее из ограниченного числа видов, даже в случае, если оно приобрело весьма широкое распространение (например, примитивное сообщество растений-однолетников или сообщество галофитов: *Suaeda salsa*, *Salicornia europaea*, *Bassia hyssopifolia*, опоясывающие все берега Аральского моря, сдвигающиеся вслед за регрессирующими водами моря, не станет экотонной системой, пока не создаст механизма устойчивого самовоспроизводства всей системы (а не отдельного каждого вида)). В то же время биотическое сообщество, занимающее ограниченную площадь, может создать устойчивую экотонную структуру за счет успешной натурализации нового вселившегося вида, оказавшегося активным ценозоообразователем, Такой пример представляют заросли солянки Пульсена (*Salsola paulsenii*) с участками астры солончаковой и лебеды татарской в зоне влияния

Каракумского канала. Это сообщество проявляет способность к самовозобновлению.

Рассмотрим особенности формирования и организацию биотических сообществ и молодых экотонных систем на примере ирригационных районов.

Формирование и особенности структуры экотонных биотических сообществ и молодых экотонных систем

Эти экотоны возникают в маргинальных, краевых участках ирригационных районов по границе с коренными экосистемами пустыни, на приоазисных землях, на орошаемых полях, на участках обширных техногенных нарушений биогеоценотического покрова и на опустынивающихся территориях. Иногда они имеют характер «раневого экотона», то есть нарушенного, переходного сообщества со смешанным, не сложившимся составом видов растений и животных, представляющим собой ответную реакцию природного комплекса на трансформирующие его воздействия. Молодые экотонные системы еще не обладают функционирующим адаптивным механизмом устойчивости и поэтому не являются геоэкотонными системами. Их устойчивость поддерживается либо за счет высокой индивидуальной пластичности слагающих сообщество видов, среди которых нередко бывает много рудеральных, слабо специализированных видов растений и животных, либо за счет возникновения условий «вторичного оптимума среды» – оптимума для немногих избранных видов [2, 15] возникающего в ряде случаев в результате хозяйственной, в том числе мелиоративной, деятельности. Многие виды организмов в составе молодых экотонных систем, напротив, оказываются неустойчивыми, и их сообщества склонны к быстрым депрессиям. Это касается и «мелиоративных экотонных систем», создаваемых специально, но проходящих через эту стадию «раневого экотона». При ослаблении управляющего воздействия на среду мелиоративные экосистемы нередко деградируют.

Молодые экотонные экосистемы находятся в состоянии постоянных быстрых преобразований, смен стадий развития, которое идет либо в направлении к коренному типу зональной элементарной экосистемы, либо приводит к новым трансформациям системы на основе вселения и натурализации несвойственных данной территории видов организмов или перегруппировок и изменения соотно-

шений аборигенных видов в сообществах. Последнее происходит обычно на фоне активизации новейших экзогенных процессов или быстрых локальных изменений эдафических условий (возрастание засоления почв, иссушение или подтопление земель и т.п.).

Для структуры молодых экотонных систем характерно, с одной стороны, отсутствие жесткой пространственной схемы организации, и, с другой, – сочетание слабо заселенных участков территории – биотических лакун и «сгущений жизни» – участков с густым растительным покровом и повышенной численностью животных. «Сгущения» состоят из немногих видов и образуются в местах, где возникают условия оптимума второго порядка. Они могут быть кратковременными, соответствующими начальной стадии развития нового сообщества, или, при определенных условиях, оказываются способными к длительному существованию. В них наблюдается спонтанная гибридизация у растений, а у животных – возникновение перегруппировок в сообществах и образование смешанных колониальных поселений (у грызунов), например, совместное обитание в одной колонии большой и полуденной песчанок. Отмечается также временное нарушение правила Гаузе.

Локальным вторичным оптимумам жизни и быстрым деструкциям некоторых ценотических группировок видов принадлежит ведущая структурообразующая роль в молодых развивающихся экотонных системах. Внутрисистемная пестрота микроучастков, различающихся по обилию организмов, преобладание однолетников и пластичных сорных видов растений могут считаться заметными особенностями молодых экотонных систем.

Полисферный многоуровневый экотон ирригационных районов

Экотон «поверхностные воды-подземные воды» представляет собой, очевидно, основное активное функциональное ядро всей экотонной системы ирригационных районов. Именно взаимодействие подземных и поверхностных вод, определяющее влагообеспеченность территории и, следовательно, условия обитания организмов и возможность формирования и развития биотических сообществ и природных систем, инициирует многоступенчатые взаимообратные – реципрокные связи между абиотическими факторами среды и биотическими агентами средообразующих процессов.

Особенности структуры и функционирования экотона «подземные воды-поверхностные воды», его многоуровневое строение и основные свойства анализируются в исследованиях профессора Жанин Жибер и ее коллег [16, 17, 18] в Университете Клода Бернара (Лион, Франция). Ими создана функциональная классификация этих экотонов, основанная на динамике водных масс, изучена изменчивость границ экотонов и некоторые биологические аспекты проблемы. Рассматривая экотон «подземные воды – поверхностные воды» в качестве функционального ядра всей сложной совокупности разнообразных биотических сообществ и экотонных систем разного возраста и различной степени сформированности, мы выделили четыре основных канала дистантных влияний этого «ядра»:

- Прямое гидродинамическое воздействие (путем фильтрации в толщу почвы и грунта);
- Изменение увлажненности территории и, соответственно, формирование особых микроклиматических условий ирригационного района при мозаичном распределении показателей микроклимата и факторов, его формирующих;
- Хемогенное воздействие на почвы и биотические комплексы путем усиления галогеохимических процессов (преимущественно за счет активизации захороненных в почве и грунте веществ и за счет поступления загрязняющих веществ из поверхностных вод);
- Биогенное воздействие за счет вселения организмов, перегруппировок видов в сообществах, формирования новых биогеоценотических цепей и их пространственного удлинения. Последнее приводит к вторичному расширению полосы влияния базового экотона «подземные воды-поверхностные воды».

Опыт исследования совокупности наземных экотонов в различных ирригационных районах Средней Азии позволил выделить несколько градаций зон влияния этого «ядра» – экотонного комплекса. Они хорошо выражены в зоне влияния Какракумского канала (Туркменистан).

- Экотон «подземные воды – поверхностные воды».
- Экстра-активный экотон «вода-суша» – это узкая полоса, включающая прибрежную часть водного объекта (канала, водохранилища, фильтрационного озера) и узкую полосу наземных экосистем,

испытывающих влияние колебаний уровня воды и периодически населяемую или посещаемую организмами-обитателями мелководья; он населен специфическим амфибиальным сообществом.

- Дистантный экотон «суша–вода» – это относительно широкая полоса, примыкающая к предыдущему экотону. Этот участок суши испытывает подтопление и сильное увлажняющее влияние водоема. Нередки выходы грунтовых вод на земную поверхность и образование фильтрационных озер. Это зона фильтрации активного гидравлического воздействия на грунтовые воды со стороны фильтрующихся (из канала) поверхностных вод. Микроклиматические показатели резко отличаются на этом участке от соседних, что позволяет существовать здесь гидрофитам и мезофитам. Идут активные гидрогенные и галогенные сукцессии в биотических комплексах. Проективное покрытие растительности высокое.
- Ирригационный экотон первого порядка – образуется в полосе несколько ослабленного гидравлического воздействия. Грунтовые воды заглублены – от 1,0 до 1,5 м. Экотонное сообщество включает в основном мезофиты, мезогигрофиты и фреатофиты; а в случае повышенного содержания солей в почве и проявления засоления или слитизации почв при переполиве возникает сообщество галофитов. Проективное покрытие широко варьирует.
- Ирригационный экотон второго порядка. Также находится в полосе ослабленного гидравлического воздействия фильтрующихся вод. Однако отличие его состоит в том, что, формируясь на повышенных формах рельефа (песчаная гряда, бугристые пески), экотонное сообщество имеет более ксерофильный облик и представлено сочетанием фрагментов коренных сообществ псаммофитов, характерных для растительности пустыни и группировок мезогигрофитов и даже галофитов, внедряющихся в сообщества псаммофитов в случае засоления подстилающих песчаный плащ пород.
- Ирригационный экотон третьего порядка. Находится в полосе (зоне) существенно ослабленного гидравлического влияния фильтрующихся вод. Этот тип экотона формируется в депрессиях рельефа земной поверхности, и его водное питание обеспечивается в не меньшей, или, возможно, в большей степени аккумуля-

цией атмосферных осадков, чем фильтрацией вод. Однако соединение обоих этих источников водного питания обеспечивает повышенную увлажненность почвы. С этим связано образование в депрессиях локальных очагов геохимической активности, часто – засоление почв и развитие галогенных сукцессий даже в небольших понижениях среди песчаных массивов. Например, такие экотонные системы, сочетающие в своем составе галофиты и псаммофиты с преобладанием первых, возникают в межрядовых понижениях в песках в ирригационных районах, расположенных в новых антропогенных оазисах, в пустынях Куракум и Кызылкум (средняя Азия).

- Краевой дистантный экотон между пустыней и ирригационным районом формируется в маргинальных участках на основе удлинения цепей биогеоценотических связей и расселения животных и растений из ирригационного района. Этот экотон сохраняет облик пустынного ландшафта, однако в состав биотических комплексов внедряются новые для аридных местообитаний виды – мезофилы и гидромезофилы. Численность их, как правило, низка. Однако их присутствие придает сообществам пустыни экотонный характер. Это особенно касается присутствия некоторых видов бабочек и птиц.

Концепции и принципы управления экотонными системами

Экотонные системы в большей мере, чем зональные, поддаются управляющим воздействиям в силу адаптированности древних экотонных структур к переменному режиму факторов среды, а также в связи с особенностями их состава, слагаемого нередко пластичными видами организмов. Молодые экотонные биотические сообщества и формирующиеся экотонные системы также доступны управлению, поскольку их структурно-функциональная организация, находящаяся в процессе становления, еще не создала системы жестких облигатных связей и коадаптации организмов. Неполноценность молодых экотонных биотических сообществ на фоне больших ресурсных возможностей, представляемых организмам средой жизни, и их упрощенная структурная организация дают хорошую возможность 1) улучшать набор видов в экотонных сообществах путем введения в их состав дополнительных полезных видов или вытеснения нежела-

тельных и 2) усложнять структурную организацию экотонной системы как путем введения в их сообщество вида-ценозообразователя, способного создавать узлы дополнительных биогеоценотических связей, так и путем мелиорации среды обитания жизни методами технических и химических воздействий, в особенности, средствами гидромелиорации.

Искусственные воздействия на экотонные биотические сообщества и на экотонные системы, использующие принципы более полной реализации естественных потенций среды обитания, когда изменения в экотонной системе не превосходят пределы ее естественных флуктуаций, но оптимизируют режим функционирования, правомерно называть «корректирующим управлением».

Концепция «корректирующего управления», которое как бы раскрывает потенции и ускоряет естественные тенденции развития экотонной системы, обеспечивает щадящий способ искусственного совершенствования организации экотона и дает хорошие практические результаты. Это осуществлено, например, при улучшении пустынных пастбищ в Средней Азии [12, 19].

Среди принципов корректирующего управления следует выделить: 1) принцип создания системы функциональной дополнителности видов организмов в сообществе (при этом всегда следует избегать вселения агрессивного сорного вида растения или животного-хищника); 2) принцип усложнения структурной организации экотона, в том числе на основе создания более сложной вертикальной (ярусной) структуры сообщества; и 3) принцип дробления биогеоценотического континуума, когда на каждой искусственно созданной границе возникает возможность самопроизвольного формирования очага активных средообразующих процессов, и где введение в экотонные сообщества новых видов (в том числе и их акклиматизация, и последующая натурализация) оказывается наиболее эффективной акцией, ибо система конкурентных взаимодействий видов здесь может быть существенно подавленной.

Названные принципы управления экотонными биотическими сообществами и экотонными системами имеют универсальный характер, однако их применение должно быть соотнесено с особенностями структурной организации различных классов экотонных

систем. Так, принцип улучшения и пополнения видового состава экотонных сообществ организмов на основе создания системы функциональной дополнительной видов и принцип усложнения вертикальной структуры сообществ наиболее эффективно могут быть применены для неполноценных по составу и несовершенных по своей структурной организации молодых экотонов. При этом возникает возможность искусственно повысить видовое разнообразие на экотонной территории и биологическое разнообразие формирующихся экотонных систем, что создает импульс к дальнейшему спонтанному возрастанию числа видов в сообществах за счет расселения как животных, так и растений. На аридных территориях при этом число видов в экотоне может возрастать в 3–7 раз.

Принцип дробления биогеоценотического континуума применим на территориях «зональных экотонов» [10] и древних геоэкотонов, где таким путем создается мозаика разновозрастных экотонных сообществ и систем, что также содействует повышению видового и биологического разнообразия и биологической продуктивности сообществ в 3–6 и даже в 10 раз.

Дробление биогеоценотического континуума может осуществляться 1) методом геоморфологических новообразований (борозды, каналы, механическое закрепление песчаного участка и т.п.) с последующей биомедиацией территории, 2) методом химических воздействий (создание полимерных пленок на поверхности песков, нефтевание и др.), 3) методом управления гидрологическим режимом водоемов и гидрологическим режимом территории. Последнее особенно важно на маргинальных участках культурных земель: на приоазисных песках, краевых частях массивов орошения, в зонах влияния на природную среду каналов и водохранилищ.

Управление составом и структурной организацией «омолаживающихся», транзитных экотонных систем дельт и пойм рек осуществляется регулированием стока, созданием дамб и проток и с помощью изменения режима и объема попусков воды из водохранилищ и регулированием уровня стояния воды на пойме.

Изменения в составе экотонных систем пойм рек с регулируемым стоком и островных экотонных систем на русловых водохранилищах обычно приводят к сокращению численности и видо-

вого разнообразия наземно живущих животных и в экотоне «вода-суша» – водных организмов, в особенности прикрепленных и малоподвижных животных, к гибели предимагинальных стадий гетеротропных видов насекомых. На Волге, на островах Волгоградского водохранилища за 30 лет снизилась численность или выпали из состава экотонных сообществ 48% видов, обитающих в пойме.

В низовьях Амударьи, в окрестностях г. Нукус, несогласованные с экологами произвольные технические сбросы воды из Тахиаташского водохранилища оказались катастрофичными для псаммофитного сообщества животных, сформировавшегося в обсохшем русле реки. После сброса воды в июле 1985 г., когда уровень воды в русле поднялся на 2,7 м, из состава сообщества, включавшего 7 видов ящериц (*Agamasanguinolenta*, *Erimasgrammica*, *E.macolata*, *E.lanceolata*, *E.arguta*, *Phinocephalusinospicua*, *Ph.mistaceus*) и змею (*Taphrametaponlincolatum*) и видов млекопитающих (*Merionestamariscinus*, *M.meridianus*, *Crocidurasauveolens*, *Dipussagitta*, *Paradopuslichtensteini*, *Lepustolai*) сохранились лишь: из рептилий 1 вид – *Agamasanguinolenta*, из млекопитающих – 2 вида: *Merionestamariscinus* и *Lepustolai*.

Изменение режима половодья и сокращения водности рек существенно нарушают состав, структуру и функционирование экотонных систем пойм и дельт рек. Особенно катастрофично проявляются такие изменения в «транзитных» экотонных системах речных долин в аридных и семиаридных зонах, где снижение обводняемости территории и общей увлажненности среды сразу же влекут аридизацию условий обитания и комплекс процессов, определяемых как опустынивание. На примере зарегулирования стока Амударьи двумя гидроузлами, создания Тахиаташского и Тюя-Муюнского водохранилищ и нерегламентированного разбора воды для орошаемого земледелия можно наблюдать картину резкой деградации такого уникального богатого своим видовым разнообразием типа экосистемы, свойственного пойменному экотону, как экосистема тугайного леса. Она включает в низовьях Амударьи 576 видов высших растений, в том числе 29 видов эндемиков, что в 6–8 раз превышает видовое разнообразие в зональных древесно-кустарниковых сообществах соседней пустыни. В настоящее время 54 вида растений тугайных сообществ, относящихся к 26 семействам и 46 родам, находятся на грани исчезновения.

Процесс деградации тугайных лесов в результате антропогенных изменений режима функционирования пойменного экотона развивается столь быстро, и зашел настолько далеко, что возникла угроза потери этого уникального типа экотонной системы. Если в начале 30-х годов тугайные леса занимали в низовьях Амударьи 300 тыс. га, то к 1986 г. их площадь составляла около 33 тыс. га. Это означает, что за 50 лет площадь, занимаемая тугайными сообществами, сократилась почти на 90%. В 80-х годах, в условиях усыхания Аральского моря и опустынивания дельтовой равнины, темп гибели тугайных экосистем был особенно высоким и определялся потерей 5778 га тугаев в год. В настоящее время тугайные леса составляют менее 3% от общей площади древесно-кустарниковых сообществ на территории Каракалпакской части региона Аральского моря.

Для сохранения уцелевших массивов и восстановления тугайных экосистем в пойме и дельте Амударьи необходимо возвращение к нормальному режиму функционирования транзитного пойменного экотона, для чего потребуется подача воды из водохранилищ в соответствующие естественному половодью сезоны для заливания междуречных понижений не менее, чем на 30 дней, а прирусловых валов на 10–12 дней. Для этого необходимо 2,5–3 км³ воды, а для обводнения лугов и сенокосов в приморской части дельты на 0,2–0,5 млн га потребуется подача 5 км³ воды [20].

Колебание уровня водоемов, приводящее то к осушению мелководий, то к затоплению их, а также части береговой суши, существенно нарушает нормальное функционирование экотона «суша-вода», где организмы производят значительную биопroduкцию и осуществляют роль биофильтров и регуляторов потока вещества между сушей и водоемом. Управление уровнем водоемов, а также состоянием биокomплексов мелководий, имеет особое значение в связи с тем, что на мелководьях идут активные процессы аккумуляции загрязняющих веществ и токсинов, а также процессы биологического очищения воды.

Нарушения этих процессов сказываются как на функционировании водных экосистем всего водоема, так и на состоянии биотических компонентов наземных экосистем побережья. Поэтому управление режимом уровня естественных и искусственных водоемов и водотоков требует разработки экологически обоснованных программ и

сезонного графика контролируемых попусков воды с учетом времени и длительности репродуктивных циклов водных и наземных организмов, в том числе гнездования птиц-обитателей побережий. От несвоевременных весенне-летних сбросов воды на реках Средней Азии страдают в первую очередь гнезда куликов: морского зуйка – *Charadrius alexandrius*, кулика-сороки – *Numenius phaeopus*, а на орошаемых массивах земель – гнезда травника – *Tringatotanus*, ходулочника – *Himantopus himantopus*, луговой гиркушки – *Glareola pratincola* и белохвостой пипалицы – *Vanellochettusia leucura*, что приводит к удлинению периода размножения за счет повторных кладок яиц и, в итоге, к сокращению числа молодых птиц в выводке и снижению численности популяций этих видов.

Управление прибрежными наземными экотонными сообществами может осуществляться:

- Прямым воздействием на состав растительного сообщества, путем посева растений тех видов, которые соответствуют условиям среды (например, галофитов и т.п.);
- Воздействием на состав и структуру сообщества путем изменения гидрогеологического режима территории, что существенно изменяет состояние влагообеспеченности местообитаний и засоленность почв;
- Подбором экологически эффективного способа природопользования, воздействующего на популяцию вида-ценообразователя в определенную фазу его развития, например, до плодоношения;

Последнее можно рассмотреть на примере практически моновидового сообщества *Salsola pelucida*, возникающего местами у ирригационных каналов в аридных районах юга Средней Азии. Это сообщество создает плотную заросль колючих растений, затрудняющую подход к воде и выпас овец. Если же солянка выкашивается весной, до ее цветения и высыхания, то зеленая масса может быть использована для силосования на корм скоту, а возобновление сообщества, лишенного полноценного плодоношения, становится затрудненным, чем снижается его устойчивость. Помехи размножению – один из важных способов борьбы с распространением сообществ сорных видов.

Пространственная организация биотического покрова аридных зон характеризуется наличием биогеоценотических узлов, дисперс-

но распределенных и образующих подобие сети, решетки или системы «островков» биогенно мелиорированной среды [22].

Этот каркас оказывается окруженным системой экотонных «бордюрных» сообществ фитоценотического уровня организации, где отмечается наибольшее видовое разнообразие. Так, в бордюрной парцеллесообщества черного саксаула – *Haloxylonaphyllum*, отмечается 32–34 вида растений, 6–7 видов рептилий, 5–6 видов млекопитающих. Парцелла-экотон характеризуется повышенной биопродуктивностью и аккумуляцией органического вещества. Эта структурная схема особенно характерна для разреженных лесов из черного саксаула в пустыне Каракум, принадлежащей зоне южных субтропических пустынь аридного пояса Палеарктики, и в пустыне Кызылкум, принадлежащей Туранской подзоне.

На тех пространствах пустынь Средней Азии, где насаждения черного саксаула отсутствуют, названная структура может быть искусственно создана путем посадок черного саксаула и посевом сопутствующих ему видов растений.

При этом, по прошествии 5–6 лет размер фитопродукции на территории, где была создана экосистема с сетью бордюрных экотонных сообществ, возрастает в 3–5 и даже 9 раз (например, с 3,0–3,6 ц/га воздушно-сухой фитомассы в первоначально полынно-эфемеровом сообществе до 10,4–33,4 ц/га в экотонном сообществе) [19]. По мере образования такой сложной экотонной структуры, путем искусственного расселения на аридной территории целого сообщества растений-средообразователей, в насаждении спонтанно формируется соответствующий зоокомплекс, включающий *Rhodospiza obsoleta*, *Hippolais rama*, *Emberiza bruniceps*, *Scotocerca inquieta*, *Passer indicus* или *P. ammodendri*.

Эту форму управления формированием экотонных систем мы назвали «биогеоценотической мелиорацией», поскольку она основывается на принципе экспериментального моделирования естественной схемы структурной организации экотонной системы, включая все ее основные функциональные элементы [2, 10]. При этом в пространственную структуру зонального биотического покрова искусственно вносится каркас экотонной системы. (Это представляет собой, таким образом, наиболее полную реализацию принципа дробления биогеоценотического континуума).

Экотонные системы, возникающие в зонах экологических катастроф, и возможности управления их развитием.

Крупномасштабные антропогенные нарушения природной среды во второй половине нашего столетия, охватившие целые регионы на разных континентах, привели к возникновению катастрофических экологических ситуаций. Таковы экологические катастрофы в Сахеле (Африка), в бассейне Аральского моря (Средняя Азия), трагедия Чернобыля (Восточная Европа) и другие. Как правило, глубокие нарушения природной среды вызывают быстрые перестройки и часто резкую деградацию природных систем – экосистем и ландшафтов. Нарушения в составе и структурной организации экосистем и в межсистемных связях разрушают эргодичность ландшафтов – функциональную общность группы генетически связанных ландшафтов. На основе этого формируется вторичный эндогенный механизм саморазрушения системы взаимодействий ландшафтов и экосистем. Это вызывает перманентные перегруппировки видов в биотических сообществах, что служит основой возникновения явлений пространственного саморасширения очага нарушений.

Трансформация природных систем при этом обычно проходит следующий ряд событий: 1) изменения среды обитания (почвы, целостности земной поверхности, условий увлаженности территории, гидрологического режима водоемов и качества вод и т.п.); 2) изменения в составе биотических сообществ, элиминация некоторых видов, в том числе ценозообразователей и нарушение или ослабление биопродукционного процесса; 3) развитие эрозионных процессов и усиление транспорта веществ, изменение и активизация геохимических потоков; 4) активизация расселения животных и растений и существенные изменения соотношения видов в сообществах, развитие быстро протекающих сукцессий; 5) разрушение структуры зональных экосистем и ландшафтов и возникновение на время хаотических перемещений организмов и случайных взаимодействий; 6) постепенно выявляются участки территории, где возникают условия «оптимума жизни второго порядка» – оптимума для немногих специфических видов и на этих территориях формируются локальные малочленные (из 3–7 видов) сообщества растений и животных, способные создавать вспышки численности некоторых

видов (например, грызунов или насекомых) и всплеск активизации биопродукционного процесса; 7) резко возрастает мозаичность экологических условий, возникает повышенная дробность и контрастность биотического покрова; 8) в этих условиях происходит формирование новой структуры изменившихся по составу биотических сообществ, которая качественно отличается от исходной более упрощенной схемой внутренних связей и несформированностью, случайным характером внешних взаимодействий. Сочетание и территориальное соседство новых, активно функционирующих микрогруппировок и сообществ организмов с быстро повторяющимся репродуктивным циклом (например, растений однолетники и двулетники – *Salicomesia europaea*, *Suaeda altissima*) и реликтовых, деградировавших прежних сообществ или их фрагментов, а также участков территорий, фактически лишенных организованного биотического покрова, создают экотонную систему, свойственную быстро изменяющимся условиям экологически дестабилизированной среды (таблица), [2, 8].

Последняя определяется как особое качественное состояние природной среды, для которого характерны новые закономерности динамики систем (в том числе «короткоживущие процессы – прерывающиеся сукцессии»), изменение внутрисистемных связей и межсистемных взаимодействий, возникновение экотонного характера структурной организации биотических сообществ, явление спонтанной гибридной дивергенции видов растений и животных, импульсное проявление биопродукционного процесса и миграций веществ и организмов. Экологическая дестабилизация природной среды служит источником и базой развития процесса экотонизации природных систем и всей ландшафтной оболочки. Этот процесс характерен для зон экологических катастроф, но проявляется на значительно большей территории.

Управление процессом экотонизации биогеоценологического и ландшафтного покрова

Множественные нарушения структуры и условий нормального функционирования элементарных экосистем, целостности и континуальности биогеоценологического покрова разнообразной антропогенной деятельностью приводит к образованию очагов структурно-функциональных перестроек экосистем, с одной стороны, и к возникновению новых граничных условий, с другой. При этом

Основные характеристики экологически дестабилизированной природной среды

Организация природных систем	Изменения в динамических характеристиках природных систем	Качественные изменения природных систем как среды обитания и тенденции развития биотических комплексов
1. Нарушения функциональной регуляции систем и ритмичности процессов	1. Ускорение экзогенных и эндогенных перестроек в естественных условиях	1. Усиление экологической дифференциации, мозаичности структуры и контрастности окружающей среды
2. Нарушения естественной структуры биогеоценозов, элементарных экосистем и ландшафтов	2. Возникновение в биоте короткоживущих процессов	2. Увеличение количества границ и пределов существования, возможность развития противоположно направленных трендов
3. Нарушение биогеоценозического континуума	3. Усиление эрозийных процессов, процессов переноса вещества, возникновения экологических комбинаций географически гетерогенных областей	3. Возникновение «вторичных оптимумов» для некоторых видов
4. Нарушение межэкосистемных и межландшафтных связей	4. Усиление видовых перестроек в сообществах и расселения организмов в пределах и за пределами областей обитания	4. Частота флуктуаций и экстремальных состояний окружающей среды
5. Разрушение условий и механизмов стабильности естественных систем	5. Феномен саморасширения очагов нарушения окружающей среды	5. Сокращение биогеоценозических циклов до субклимакса и дисклимакса. Биотическая структура экосистем становится «моложе» и проще. Сокращается видовое разнообразие
	6. Экотонизация биогеоценозического покрова	6. Полуприродные агротехногенные и техногенные системы включаются в состав естественных систем
		7. Увеличение загрязнения окружающей среды и токсических характеристик биотических сообществ дефектных индивидуальных тератологических изменений.
		8. Усиление спонтанной гибридизации видов, активизируются микроволуционные процессы

изменения организации элементарных экосистем происходят в повышенном темпе, разрушаются внутрисистемные связи, но видовое разнообразие при этом может возрастать за счет вселения новых видов растений и животных. Нарушенная экосистема приобретает особенности молодой экотонной системы – упрощенную структуру, хаотичность внутрисистемных связей, повышенную реактивность на внешние воздействия, ослабление устойчивости системы, хотя биологическая продукция экотонного сообщества может при определенных условиях возрастать.

Что касается самой территории, на которую пали разрушительные воздействия человека, и где происходят активные перегруппировки видов в сообществах и расселение организмов, то она также приобретает характер экотона, где соседствуют коренные зональные экосистемы, их фрагменты и новообразованные экотонные сообщества и системы, находящиеся на разных стадиях развития, а также агропромышленные и техно-природные системы. Такой очаг или полоса нарушений обычно имеет тенденцию к пространственной экспансии и захвату все большей территории в результате возникновения новых биогеоценотических связей и активного дальнейшего расселения видов – вселенцев, участие которых в перестройках связей внутри биотических сообществ создает затем эндогенный механизм поддержания внутрисистемного дисбаланса.

Одновременно нарушается и схема межэкосистемных связей. В результате весь ландшафт утрачивает устойчивость и вовлекается в орбиту достаточно быстрых трансформаций.

Этот агрессивный процесс, в основе которого лежит образование многочисленных новых границ между экосистемами и возникновение экотонных сообществ, мы называем «процессом экотонизации биогеоценотического покрова».

Широкое распространение экотонизация в различных природных зонах ставит задачи:

- Детального изучения его механизмов, стадий развития, темпов, масштаба и ареала проявления;
- Организации специального мониторинга процесса экотонизации с картографическим отражением его распространения;
- Прогноз развития;

- Определения его значения в региональных и глобальных процессах.

Контроль за процессом экотонизации и управления им, очевидно, уже вполне актуальны. Например, на аридных землях Средней Азии, по нашим наблюдениям, экотонизацией охвачено 70–80 млн га, что составляет около трети площади этого региона.

Сложность управления процессом экотонизации заключается в том, что изменения в экосистемах с какой-либо определенной стадии становятся необратимыми. Это хорошо прослеживается на примере развития ирригационного опустынивания и его экологических последствий [2, 21, 22].

В связи с этим, важнейшими путями ограничения развития процесса экотонизации следует признать усилия по сбалансированному развитию природы и хозяйства на основе обновленной стратегии природопользования и применения комплекса специальных мелиораций в природоохранных целях.

Разработка таких систем требует проведения специальных исследований, в основе которых может быть использована концепция накладных процессов – подыскание специальных мер, способных изменить тренд наметившихся изменений уже на ранних стадиях их проявления [23].

В связи с практической потребностью управления экотонами и процессом экотонизации, особенно на засушливых территориях, мы полагаем, что целесообразно на основе уже полученных под эгидой СКОПЕ и ЮНЕП научных целей и разработок подготовить и осуществить на основе широкой кооперации специалистов из разных стран Международный проект: «Процесс экотонизации биогеоценотического и ландшафтного покрова; прогноз развития, региональные и глобальные изменения и стратегия управления». Основная цель проекта – установление закономерностей и темпов процесса экотонизации в связи с ирригационным, пастбищным и промышленным освоением территории и воздействием гидротехнического строительства. В качестве приоритетного объекта могут быть выбраны экотоны засушливых зон.

Проект мог бы включать следующие разделы:

а) исследования изменений структурно-функциональной организации экосистем, их устойчивости и принципов управления фор-

мированием экотонных систем; б) изучение изменений репродуктивных циклов доминантных видов и видов – средообразователей в растительном покрове и животном населении в связи с быстрыми изменениями среды и развитием процесса экотонизации; в) изучение изменений биопродуктивного процесса в условиях экотонизации, оценка и прогноз изменений объема качества биопродукции экотонных систем и их суммарного регионального вклада в биосферную циркуляцию вещества и энергии; г) изучение развития процесса экотонизации и районирование территории засушливых зон по степени и формам экотонизации.

Потребность в организации такого проекта актуальна, а уже имеющиеся банк данных и концептуальные идеи могут обеспечить выполнение предлагаемого комплекса исследований при условии широкой международной кооперации.

В качестве приоритетных районов исследования можно рекомендовать районы ирригации в Средней Азии (особенно юг Туркменистана), районы Нижнего Поволжья, Средиземноморья (плато Ардеш на юге Франции и семиаридные районы Испании), бассейн оз. Убсу-Нур (Тува) и долину озер в северо-западной Монголии и некоторые районы Индии и Китая.

ЛИТЕРАТУРА

1. Залетаев В.С. Экотонные экосистемы как географическое явление и проблема экотонизации биосферы // Современные проблемы географии экосистем. М.: Изд-во МГУ. 1984. С. 53–55.
2. Залетаев В.С. Экологически дестабилизированная среда (экосистемы аридных зон в изменяющемся гидрологическом режиме). М.: Наука, 1989. 150 с.
3. Clements F.E. Plant succession and indicators. N.Y., 1928.
4. Быков Б.А. Экологический словарь. Алма-Ата: Кайнар, 1983.
5. Сочава В.Б. Растительный покров на тематических картах. Новосибирск: Наука, 1979. 189 с.
6. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
7. Walter H., Box E. Global classification of natural terrestrial ecosystems // Vegetatio. 1976. Vol. 32. №2.
8. Залетаев В.С. Концепция экологически дестабилизированной окружающей среды как основа изучения современного динамизма экосферы аридных зон // Экологические проблемы освоения пустынь и охрана природы. Ашхабад: Ылым. 1986. С. 19–21.

9. Залетаев В.С. О своеобразии быстрых трансформаций природной среды на осушающемся побережье Аральского моря // Биогеографические аспекты опустынивания. М.: МЦ РГО, 1985. С. 12–30.

10. Залетаев В.С. О механизме устойчивости биогеоценозов экологически переходных территорий в южных пустынях СССР // Проблемы освоения пустынь. 1979. №6. С. 38–44.

11. Нечаева Н.Т. Видовой состав и распространение пустынных осок подрода в Юго-Восточной Туркмении // Изв. АН ТССР. Сер. Биол. 1961 а. №3.

12. Нечаева Н.Т., Приходько С.Я., Шамсутдинов З.Ш., Корсун В.А. Рекомендации по созданию долгодетных осенне-зимних пастбищ в предгорных пустынях Средней Азии. М.: Колос, 1971. 35 с.

13. Ходашева К.С., Денисман Л.Г. Роль сусликов в формировании комплексного почвенного покрова в глинистой полупустыне Заволжья // Почвоведение. 1961. №1.

14. Абатуров Б.Д., Зубкова Л.В. Норы малых сусликов и их роль в формировании западного микрорельефа почв Северного Прикаспия // Почвоведение. 1972. №5.

15. Залетаев В.С. Природная среда и птицы северных пустынь Закаспия. М.: Наука, 1968. 256 с.

16. Gibert J., Dole-Olivier M.J., Marmonier P. and Ph. Vervier. Surface Water-Groundwater ecotones// Ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones/ Eds. Naiman R.J. and H. Decams. Pantheon Publ., London. 1990. Ph. 199–225.

17. Gibert J., P. Manmonier, M.-J. Turguin and D. Marton. Anthropogenic disturbance of surface landscape: consequences on Groundwater ecosystems// Terrestrial and aquatic ecosystems perturbation and recovery/ Eds. O.Ravera. Ellis Harwood Limited. 1991. Pp. 310–319.

18. Gibert J. Groundwater ecology from the perspective of environmental sustainability. Am. Eater Res. Assoc. G.A. Stanford and J.J. Simons Eds. 1992. P. 3–13.

19. Шамсутдинов З.Ш. Создание долгодетных пастбищ в аридной зоне Средней Азии. Ташкент: Фан, 1975. 176 с.

20. Залетаев В.С., Новикова Н.М. Биота Аральского региона // Вестник Академии наук СССР. 1991. №10. С. 57–67.

21. Алексеева Н.Н., Куракова Л.И. Экологические аспекты гидрорегионации. Глава 1.3. Азия // Охрана природы и освоение природных ресурсов. М. ВИНТИ. 1989. Т.23. С. 56–96.

22. Zaletaev Arid land irrigation and desertification//Arid land irrigation and Ecological management/ Ed. by S.D. Singh. Science Publish. Jodhpur (India). 1991. Pp. 401–441.

23. Залетаев В.С. Анализ экологической дестабилизации природной среды как путь познания деструктивных и созидательных процессов в природно-антропогенных системах // Земледелие и глобальные проблемы современности. М.: ИГ АН СССР, 1988. С. 99–101.

Зекцер Игорь Семёнович

(2.5.1937 – 24.5.2016)

Игорь Семёнович Зекцер – крупнейший учёный-гидрогеолог, один из основоположников учения о закономерностях формирования подземного стока, доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик Болгарской академии наук, лауреат Государственной премии СССР, дважды лауреат премии РАН им. Ф.П. Саваренского.

И.С. Зекцер родился 2 мая 1937 г. в г. Москве. После окончания средней школы в 1954 г. поступил на геологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, который окончил в 1959 г.

Свою научную деятельность начал ещё в студенческие годы на кафедре гидрогеологии МГУ им. М.В. Ломоносова (далее МГУ). После окончания университета был распределён на работу в научно-исследовательский сектор геологического факультета МГУ, где вошёл в состав большого творческого коллектива гидрогеологов МГУ и гидрологов Государственного гидрологического института по проведению региональной оценки и картированию естественных ресурсов подземных вод всей территории СССР. Эти работы были вызваны запросами практики – необходимостью определения перспектив использования подземных вод при разработке водохозяйственных балансов страны в целом и её отдельных регионов. В этой крупной исследовательской работе И.С. Зекцер был ответственным исполнителем по республикам Прибалтики, Белоруссии, Карело-Кольскому региону и Прикаспию. Основные методы региональной оценки ресурсов подземных вод базировались на анализе и обработке имеющейся гидрогеологической и гидрологической информации и не требовали проведения специальных дорогостоящих работ, что поз-



волило впервые в мировой практике в кратчайшие сроки оценить восполняемые ресурсы пресных подземных вод, составить и опубликовать карту подземного стока СССР в масштабе 1:5 000 000.

В 1964 г. закончил заочную аспирантуру МГУ и защитил кандидатскую диссертацию, основные результаты которой опубликованы в его первой монографии: Зекцер И.С. «Естественные ресурсы пресных подземных вод Прибалтики» (1968 г.).

В 1965–68 гг. работал в научно-исследовательском институте ВСЕГИНГЕО в должности старшего научного сотрудника, где продолжил исследования подземного стока, а также водного баланса на репрезентативных речных бассейнах, включённых в Программу Международного гидрологического десятилетия (позднее – Международная гидрологическая программа).

В 1968 г. Игорь Семёнович был приглашен на работу в Институт водных проблем АН СССР, где работал в должности старшего научного сотрудника, зав. лабораторией, с 1972 г. – зав. отделом подземных вод и проблем подземного стока, а затем (более 40 лет) возглавлял лабораторию региональных гидрогеологических проблем. В эти годы совместно с другими организациями была проведена работа по составлению более детальной карты подземного стока территории СССР в масштабе 1:2 500 000, что позволило выявить основные закономерности формирования и распределения ресурсов подземных вод в различных ландшафтно-климатических и геолого-гидрогеологических условиях территории страны.

В 1970-е гг. в качестве самостоятельного научного направления начало формироваться учение о подземном стоке, включающее изучение процессов взаимосвязи подземных и поверхностных вод с учётом их изменчивости во времени и пространстве; исследование особенностей формирования подземного стока в естественных и нарушенных условиях; оценку роли подземных вод в общих водных ресурсах и водном балансе речных бассейнов. Его создателем можно по праву считать И.С. Зекцера, который впервые изложил основные принципы развития исследований в монографии: И.С. Зекцер «Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения», М: Изд. Наука, 1977, удостоенной в 1980 г. премии РАН имени Ф.П. Саваренского за выдающиеся работы в области исследований вод суши.

И.С. Зекцер усовершенствовал методы регионального оценивания, прогноза и картирования естественных ресурсов подземных вод. Он – один из основных авторов уникальных карт подземного стока СССР, Центральной и Восточной Европы. В 2001 г. Игорь Семёнович стал дважды лауреатом премии имени Ф.П. Саваренского как один из авторов «Карты гидрогеологических условий и подземного стока Мира», изданной в США под эгидой ЮНЕСКО.

В начале 1980-х гг. по инициативе Сибирского отделения Академии наук СССР выполнялись работы по составлению шеститомной монографии «Основы гидрогеологии», в которой изложены теоретические и научно-методические принципы изучения подземных вод. И.С. Зекцер принимал активное участие в этих работах в качестве члена редколлегии, одного из основных авторов и редактора тома «Гидрогеодинамика». За монографию «Основы гидрогеологии» И.С. Зекцеру в составе авторского коллектива присуждена Государственная премия СССР (1986 г.).

В последние годы Игорь Семёнович большое внимание уделял изучению, оценке и картированию природной защищённости подземных вод от опасности загрязнения. Рассматривая пресные подземные воды как один из важных компонентов окружающей среды, он анализирует опасность негативного воздействия крупного отбора подземных вод на речной сток, поверхность суши, растительность. Цель этих исследований – обоснование перспектив рационального использования подземных вод в различных геолого-гидрогеологических условиях с тем, чтобы не допустить их истощения и загрязнения.

И.С. Зекцер – автор 14 монографий и более 250 статей. Результаты его фундаментальных исследований получили заслуженное признание в нашей стране и за рубежом; изданы в США, Франции, Болгарии и других странах. В числе наиболее значимых научных работ можно отметить монографии: I. Zektser «Groundwater and the Environment Applications for the Global Community», Lewis Publishers, 2000, 175 p.; Зекцер И.С. «Подземные воды как компонент окружающей среды». М., «Научный мир», 2001, 20,5 усл. печ. л.; I.S. Zektser, G.L. Everett, R.G. Dzhamalov et all. «Groundwater resources of the World and their use», UNESCO 2004. 347 p.; Igor S. Zektser, Roald G. Dzhamalov. Submarine Groundwater CRC Press, USA, 2007, 466 p.;

И.С. Зекцер большое внимание уделяет развитию международных научных связей. Начиная с 1990 г., он совместно с М.Г. Хубларяном, В.А. Мироненко и Р.Г. Джамаловым организует несколько советско-американских конференций по гидрологическим и гидрогеологическим проблемам охраны окружающей среды (с 1992 г. они стали называться конференциями стран СНГ и США). В этих конференциях участвовали и выступали с докладами ведущие специалисты в области водных проблем различных ведомств большинства стран СНГ и многих научных организаций и университетов США.

В 1991 г. Игорь Семёнович был приглашён Американским агентством по охране окружающей среды в Институт земной коры Калифорнийского университета для проведения совместных научных исследований по водным проблемам. Опираясь на опыт отечественных работ, под руководством И.С. Зекцера впервые была проведена количественная оценка и картирование ресурсов подземных вод штата Калифорния.

Обширна международная научная деятельность Игоря Семеновича. В начале 1990-х гг. И.С. Зекцер избран членом бюро Международной ассоциации гидрогеологов (МАГ). В течение ряда лет возглавлял Российский национальный комитет Международной ассоциации гидрологических наук (МАГН). Игорь Семёнович неоднократно выступал с докладами на многих международных симпозиумах, конференциях и съездах, проводимых ЮНЕСКО, МАГ, МАГН, являясь членом научно-организационных комитетов этих мероприятий. И.С. Зекцер возглавлял ряд международных рабочих групп ЮНЕСКО, в частности монографии «Ресурсы подземных вод мира и их использование» (главный редактор И.С. Зекцер), изданной ЮНЕСКО в 2002 г. С 2000 г. Игорь Семёнович являлся членом комиссии по проблемам охраны окружающей среды Международного союза геологических наук и руководителем рабочей группы «Геология и экосистемы». Этой рабочей группой с участием ученых 13 стран составлена монография аналогичного названия, опубликованная в 2006 г. В 2002 г. Игорь Семенович избран членом бюро Научного совета ЮНЕСКО по геологическим наукам, являясь экспертом ЮНЕСКО по изучению подземных вод. В последние годы И.С. Зекцер и Р.Г. Джамалов – эксперты-консультанты Бюро по водным ресурсам Тайваня. Под их руководством и

при непосредственном участии составлен атлас подземных вод этой страны, подготовленный к изданию.

И.С. Зекцер принимает активное участие в научно-организационной работе. Член учёного совета ИВП РАН, член редколлегии журнала «Водные ресурсы» (с 1994 по 2005 г. – заместитель главного редактора), член диссертационных советов при ИВП РАН и геологическом факультете МГУ.

За заслуги в развитии гидрогеологической науки и подготовку научных кадров Игорю Семёновичу присвоено почётное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». Он избран академиком Российской академии естественных наук, Российской экологической академии, Нью-Йоркской академии наук, членом Американского института гидрологии.

*Р.Г. Джамалов (ИВП РАН),
А.В. Четверикова (ИВП РАН),
М.И. Степанова (ИВП РАН)*

Современное состояние региональных исследований пресных подземных вод¹

И.С. Зекцер

Подземные воды имеют ряд специфических особенностей. Главная из них – возобновляемость подземных вод в процессе общего круговорота влаги, что коренным образом отличает их от всех других полезных ископаемых. Другая существенная особенность подземных вод – их подвижность и тесная взаимосвязь с другими компонентами окружающей среды (атмосферными осадками, речным стоком, водоемами, морями, ландшафтами, растительностью) [12, 36]. Именно эти особенности подземных вод определяют необходимость проведения широкомасштабных региональных исследований, направленных на изучение закономерностей формирования и распространения подземных вод, их ресурсов и качества в различных природно-климатических и геолого-структурных условиях.

Проблемы региональной гидрогеологии всегда были приоритетными в нашей стране по сравнению с другими странами. Так, в США, Германии, Франции традиционно большее внимание уделялось локальным вопросам, связанным с расчетом водопритоков к скважинам и горным выработкам, оценкой и предотвращением загрязнения подземных вод на конкретных участках, искусственным восполнением подземных вод. Лишь в последние десятилетия в некоторых странах выполнены крупные региональные обобщения, опубликованные в виде гидрогеологических карт. Здесь прежде всего следует назвать «Атлас подземных вод США» [31], гидрогеологическую карту Китая масштаба 1:4 000 000 [32] и др. В последние годы под эгидой ЮНЕСКО выполнены работы по составлению гидрогеологической карты мира масштаба 1:50 000 000 и 1:25 000 000.

В нашей стране с учетом накопленных знаний в настоящее время можно выделить следующие 5 основных направлений региональной гидрогеологии: 1) изучение общих закономерностей формирования и распространения подземных вод с составлением гидрогеологических карт территории страны и ее крупных регионов и речных бассейнов; 2) региональная оценка и картирование подземного стока;

¹ И.С. Зекцер Современное состояние региональных исследований пресных подземных вод. В сб. «Ресурсы подземных вод. Современные проблемы изучения и использования. М., Изд-во РУДН С. 16–29.

3) оценка и картирование защищенности пресных подземных вод от антропогенного загрязнения; 4) выявление роли подземных вод в общих водных ресурсах и водном балансе отдельных регионов, включая береговые зоны морей и океанов и 5) определение перспектив использования подземных вод трансграничных водоносных горизонтов для водоснабжения и орошения прилегающих территорий.

Ниже дается краткая характеристика современного состояния исследований по этим направлениям.

Изучение общих закономерностей формирования и распространения подземных вод

Основным объектом и предметом исследований региональной гидрогеологии являются подземные воды и гидрогеологические условия отдельных регионов и Земли в целом. Ее задача – выявление региональных закономерностей распространения и условий залегания подземных вод, изменения их свойств и качества, особенностей движения, баланса режима, ресурсов и генезиса подземных вод в различных природно-климатических, геологических и антропогенных условиях.

Закономерности формирования и распространения подземных вод изложены в работах А.Н. Семихатова, В.С. Ильина, Ф.П. Саваренского, Г.Н. Каменского, М.М. Толстихиной и Н.И. Толстихина, А.М. Овчинникова, В.М. Швеца, И.К. Зайцева, В.А. Всеволожского, В.А. Кирюхина и других отечественных ученых [9–12]. Не считая возможным в статье излагать результаты исследований общих проблем гидрогеологии, отметим, что ими были разработаны и научно обоснованы принципы гидрогеологического районирования и картографирования. Основные принципы гидрогеологического картирования и классификация гидрогеологических карт рассмотрены в [21, 22]. В общем виде гидрогеологические карты делятся на карты общего назначения (собственно гидрогеологические) и специализированные или отраслевые. Гидрогеологические карты могут классифицироваться по нескольким признакам: кондиционности, целевому назначению, масштабу и территориальному охвату, разнообразным способам изображения и другим. Среди гидрогеологических карт общего назначения в нашей стране необходимо упомянуть Гидрогеологическую карту СССР масштаба 1:2500 000, гидрогеохимическую карту СССР масштаба 1:5000 000. Несмотря на то, что эти

карты составлены более полувека тому назад, они достаточно полно отражают основные региональные закономерности формирования и распространения подземных вод (с учетом их генезиса, ресурсов, качества, температуры, химического и газового состава и других характеристик) на основе имеющегося в то время фактического материала. Из числа мелкомасштабных карт, опубликованных в последние годы, важно отметить Карту гидрогеологических условий и подземного стока Мира масштаба 1:10 000 000, изданную ЮНЕСКО [38]. Эта карта имеет двойное назначение: с одной стороны она отражает общие гидрогеологические условия формирования и распространения подземных вод, состав водоносных горизонтов и качество подземных вод и другие факторы их генезиса, а с другой – характеризует ресурсы пресных подземных вод.

В настоящее время с учетом накопленного фактического материала назрела потребность в составлении более крупномасштабной общей гидрогеологической карты территории России (масштаба 1:2500 000 или даже 1:1000 000) или атласа, которые бы отражали специфику формирования пресных и солоноватых подземных вод различных регионов в условиях изменяющегося климата и возрастающего влияния антропогенных факторов.

Региональная оценка и картирование подземного стока

Региональная количественная оценка подземного стока, сопровождающаяся, как правило, составлением специализированных карт различного масштаба, представляет значительный интерес для наук о Земле и прежде всего гидрогеологии, гидрохимии и гидрологии. Результаты такой оценки позволяют выявить закономерности формирования и распределения подземного стока в различных природно-климатических и гидролого-гидрогеологических условиях, что может служить основой для прогнозирования изменений подземной гидросферы (прежде всего, зоны активного водообмена) под влиянием изменений климата и возрастающей антропогенной нагрузки [25]. Количественные данные о подземном стоке помогают определить роль подземных вод в общих водных ресурсах и водном балансе различных регионов, что имеет важное значение при разработке схем их комплексного использования и охраны [9].

Впервые региональная оценка и картирование в мелком масштабе подземного стока было выполнено в Советском Союзе в начале 1960-х гг. большой группой гидрогеологов и гидрологов под руководством проф. Б.И. Куделина. Опубликованные карты (Карта подземного стока СССР и Карта подземного стока СССР в процентах от общего речного стока) масштаба 1:5000 000 [14, 15] послужили основой для разработки схем комплексного использования и охраны водных ресурсов страны и ее отдельных регионов.

Среди выполненных и опубликованных в последующие годы работ по региональной оценке и картированию подземного стока следует назвать карты подземного стока территории бывшего Советского Союза в масштабе 1:2500 000 [16], карту подземного стока Центральной и Восточной Европы масштаба 1:1500 000 [17] и недавно вышедшую из печати карту гидрогеологических условий и подземного стока Земного шара в масштабе 1:10 000 000 [38]. Последние две карты составлены и отредактированы международной группой экспертов под руководством и при непосредственном участии российских специалистов в рамках Международной гидрогеологической программы ЮНЕСКО.

Принципиальным отличием всех указанных карт подземного стока, а также аналогичных по содержанию карт подземного стока отдельных артезианских бассейнов России, от всех ранее опубликованных гидрогеологических карт, является то, что на них впервые показаны региональные количественные характеристики естественных ресурсов подземных вод ($л/с \cdot км^2$) и их роль в общих водных ресурсах и водном балансе.

Карты подземного стока позволяют решать следующие практические задачи, связанные с комплексным использованием и охраной водных ресурсов, а именно определять естественные ресурсы пресных подземных вод для оценки и прогноза перспектив их использования; величину питания подземных вод при региональных оценках их эксплуатационных ресурсов; величину подземной составляющей речного стока как наиболее устойчивой части ресурсов поверхностных вод; величину подземного стока как элемента водного баланса при перспективном планировании комплексного использования и охраны водных ресурсов.

По отдельным крупным артезианским бассейнам территории СНГ выполнены региональные оценки подземного стока и естественных ресурсов подземных вод [3, 6, 8, 19, 26].

В заключение раздела следует подчеркнуть, что в настоящее время назрела необходимость оценки и картирования подземного стока территории России с учетом накопленного в последние десятилетия фактического материала, оценки тех изменений, которые происходят в подземных водах под влиянием все возрастающих антропогенных нагрузок и изменений климата. Разработанные совместно Институтом водных проблем РАН, кафедрой гидрогеологии МГУ и Государственным гидрологическим институтом научно-методические основы региональной оценки и картирования подземного стока позволяют выполнять его региональную оценку и картирование в разнообразных природно-климатических и гидролого-гидрогеологических условиях и составить комплекс соответствующих карт.

Региональная оценка и картирование защищенности пресных подземных вод

В последние десятилетия во многих регионах мира отмечается прогрессирующее загрязнение пресных подземных вод, охватывающее часто значительные территории. В подавляющем большинстве случаев оно является прямым следствием общего загрязнения окружающей среды. Практически любой вид хозяйственной деятельности (прежде всего, разработка месторождений полезных ископаемых, внесение удобрений и почву, гидротехническое и гражданское строительство, вырубка леса и др.) неизбежно сказывается на качестве подземных вод и часто проявляется в их загрязнении. Серьезную опасность представляет и захоронение токсичных отходов в глубокие водоносные горизонты.

Подземные воды загрязняются в основном сульфатами, хлоридами, соединениями азота, нефтепродуктами, фенолами, соединениями железа, тяжелыми металлами, содержание которых на отдельных участках превышает их предельно допустимые концентрации в десятки и даже сотни раз. Так, на территории России выявлено более 6000 участков загрязнения подземных вод [13], из которых 40% связаны с деятельностью промышленных предприятий, 13% с деятельностью сельскохозяйственных предприятий, 12% загрязнен-

ных участков связаны со сточными водами и отходами объектов коммунального хозяйства. Большинство участков загрязнения (около 70%) выявлены в первых от поверхности водоносных горизонтах, не являющихся, как правило, источниками централизованного питьевого водоснабжения населения. Площади загрязнения водоносных горизонтов в отдельных случаях достигают десятков и даже первых сотен квадратных километров (Республика Дагестан, Пермский край, Новосибирская область, Хабаровский край, Республика Татарстан и др.).

В условиях существующей и возможной опасности загрязнения пресных подземных вод, прежде всего как основного источника хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, особое практическое значение приобретают исследования по региональной оценке и картированию защищенности подземных вод от загрязнения. Под защищенностью подземных вод понимается свойство природной системы, позволяющее сохранить на прогнозируемый период состав и качество подземных вод соответствующими требованиям их практического использования. Противоположное понятие, широко применяемое в странах Европы и Америки, – уязвимость подземных вод. Понятно, что чем больше защищенность подземных вод, тем меньше их уязвимость к загрязнению, и наоборот.

Концепция уязвимости подземных вод основана на предположении, что геологическая среда может обеспечить некоторую степень защиты подземных вод от природного и антропогенного воздействий. Термин «уязвимость подземных вод по отношению к загрязнению» был введен французским гидрогеологом Ж. Марга [33] в конце 1960-х годов. Первая синоптическая карта уязвимости водоносного горизонта по отношению к загрязнению в масштабе 1:1 000 000 была опубликована во Франции [29].

Оценка уязвимости подземных вод к загрязнению является по существу гидрогеологическим и геоэкологическим обоснованием мер по их защите в различных природных и антропогенных условиях. По опыту ряда стран (Россия, США, Германия, Италия и др.) можно осуществить региональную оценку и картирование природной уязвимости водоносных горизонтов, используемых для водоснабжения и ирригации. Эта оценка обычно основана на анализе и обработке всех имеющихся гидрогеологических данных и прежде

всего данных, характеризующих защитные свойства зоны аэрации. Она осуществляется в двух направлениях: качественная оценка территории для определения степени влияния различных природных и антропогенных факторов на уязвимость водоносных горизонтов, позволяющая сравнивать различные части территории с точки зрения защищенности подземных вод от загрязнения; расчет времени (скорости) проникновения конкретного загрязнителя в водоносный горизонт с учетом природных свойств водовмещающих и перекрывающих пород и миграционных свойств загрязнителя.

Можно выделить и два различных подхода: первый – оценка и картирование защитных свойств или уязвимости подземных вод какой-либо территории без учета характеристик и свойств конкретных загрязнителей, и второй – оценка и картирование защитных свойств природной системы применительно к конкретному виду загрязнения.

Критический анализ существующих методов оценки и картирования защищенности подземных вод, включая весьма популярный за рубежом метод «Драстик-индекс», приведен в работе [30]. Одним из основателей отечественной методики оценки защищенности подземных вод от загрязнения является В.М. Гольдберг [4, 5], который предложил бальную оценку влияния различных природных факторов на уязвимость подземных вод. Развитие методики количественной оценки скорости или времени проникновения загрязнения с поверхности земли до уровня подземных вод осуществлялось в работах А.П. Белосовой, К.Е. Питъевой, И.С. Зекцера, И.С. Пашковского, И.А. Поздняковой, М.В. Лехова, В.А. Мироненко, В.Г. Румынина, Л.М. Рогачевской, О.А. Каримовой и других отечественных специалистов.

Следует подчеркнуть, что наиболее важной в практическом отношении является региональная оценка и картирование времени, в течение которого загрязнитель (или загрязненный инфильтрующий с поверхности поток) достигает уровня подземных вод. Расчеты времени проникновения загрязнителя с поверхности земли до уровня подземных вод с учетом основных природных фильтров часто выполняются с использованием современных компьютерных программ.

Степень влияния основных природных факторов на уязвимость подземных вод различна. Так, для безнапорных вод основными фак-

торами, определяющими возможность проникновения загрязнителя в подземные воды с поверхности земли, являются мощность, состав и сорбционная способность пород vadозной зоны, а для напорных – соотношение уровней (напоров) оцениваемого и вышележащего безнапорного (т.е. потенциально подверженного загрязнению) водоносных горизонтов и фильтрационные свойства разделяющего их водоупора. Поэтому региональная оценка и картирование уязвимости должны проводиться отдельно для основных водоносных горизонтов, воды которых используются сейчас или будут использоваться в перспективе для водоснабжения или орошения [1,2, 12, 35].

В нарушенных по сравнению с естественными или уже сложившимися условиями влияние основных факторов на защищенность подземных вод может значительно меняться. Так, интенсификация отбора подземных вод из безнапорного горизонта приводит к увеличению глубины залегания грунтовых вод (увеличению мощности vadозной зоны), что меняет (во многих случаях улучшает) их защищенность от загрязнения с поверхности земли.

Иная картина при интенсификации водоотбора из напорного горизонта. Например, если в определенных естественных условиях перетекание сверху в напорный водоносный горизонт потенциально загрязненных подземных вод практически отсутствует, то в условиях эксплуатации при снижении напоров оцениваемого горизонта может произойти изменение соотношений уровней напорного и вышележащего безнапорного горизонта, что значительно увеличит опасность загрязнения рассматриваемого водоносного горизонта и даже может привести к тому, что он из защищенного превратится в незащищенный.

Результаты количественной оценки и картирования уязвимости подземных вод к загрязнению могут быть использованы для разработки стратегии использования и охраны подземных вод в районах с различной природной уязвимостью; обоснования планов размещения и развития крупных промышленных и сельскохозяйственных проектов с опасными отходами и сточными водами; гидрогеологического обоснования различных водозащитных мероприятий; обоснования выбора мест для аккумуляирования и хранения стоков.

Изучение роли подземных вод в общих водных ресурсах и водном балансе отдельных регионов, включая береговые зоны морей и океанов

Исследования по региональной количественной оценке подземного стока в реки и моря дают возможность определить роль подземных вод в общих водных ресурсах и водном балансе отдельных регионов. Такая оценка имеет важное практическое значение прежде всего при составлении региональных схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, поскольку позволяет сопоставить ресурсы подземных и поверхностных вод и на количественной основе определить перспективы их использования.

Для оценки используются значения коэффициентов подземного стока и коэффициентов подземного питания рек. Коэффициенты подземного стока – это отношение (обычно в процентах) общего подземного стока, выраженного в мм/год, к выпадающим атмосферным осадкам, а коэффициенты подземного питания рек – отношение подземного притока в реку (тоже обычно в процентах) к общему расходу реки за тот же период.

Многолетние исследования, выполненные Институтом водных проблем РАН, геологическим факультетом МГУ и Государственным гидрологическим институтом, и накопленный опыт международных работ, выполненных в рамках Международной гидрологической программы ЮНЕСКО по проблеме изучения и картирования подземного стока, позволили установить основные закономерности распределения значений коэффициентов подземного стока и коэффициентов подземного питания рек в различных природно-климатических и гидрогеологических условиях. К числу таких работ в первую очередь следует отнести международный проект «Роль подземных вод в гидрологическом цикле и континентальном водном балансе», выполненный под руководством советских специалистов в соответствии с Международной гидрологической программой ЮНЕСКО [34], карты подземного стока территории СССР в масштабе 1:5000 000 [14, 15] и в масштабе 1:2500 000 [16], карту подземного стока Центральной и Восточной Европы и соответствующую монографию [17, 24]. Целесообразно отметить карту подземного стока Калифорнии [36], а также, в первую очередь, карту гидрогеологических условий и подземного стока Мира в масштабе 1:10 000 000 [38].

Основные особенности распределения коэффициентов подземного стока, показывающих какая часть атмосферных осадков идет на питание подземных вод, определяются влиянием комплекса природных факторов, среди которых ведущие – соотношение атмосферных осадков и испарения, состав и мощность пород зоны аэрации.

На территории России и стран СНГ значения коэффициентов подземного стока составляют в среднем около 10%, изменяясь от 1% и менее до 50% и более.

Наличие высоких значений коэффициентов подземного стока (более 100%) свидетельствует о существенном участии в питании подземных вод помимо инфильтрации атмосферных осадков иных источников их формирования, включая потери речного стока и питание подземных вод за счет интенсивного, превышающего нормы орошения.

Для равнинной территории как общая закономерность прослеживается широтная зональность – уменьшение коэффициентов подземного стока с северо-запада на юго-восток с 10–20% в зоне избыточного увлажнения до 1% и менее в степных и полупустынных районах. В ряде районов эта закономерность «нарушается» аномалиями – главным образом увеличением значений коэффициентов подземного стока.

В первую очередь это наблюдается на возвышенностях, что обусловлено обилием выпадающих здесь атмосферных осадков и улучшением условий их инфильтрации (Валдайская, Средне-Русская, Приволжская возвышенности, Енисейский кряж, Северо-Байкальское нагорье и др.).

В горных районах одновременно с увеличением количества атмосферных осадков с высотой местности возрастают (до определенных пределов) и коэффициенты подземного стока. Так, в Карпатах они возрастают от 5 до 10–15%, на Урале – от 10 до 20–40%, на Алтае – от 5–10 до 15–20%. На Кавказе и в горах Средней Азии увеличение коэффициентов подземного стока (до 25–35%) проявляется наиболее отчетливо.

В районах развития карста также высоки значения коэффициентов подземного стока (до 30–40% и более на Силурийском плато, на Оного-Северо-Двинском междуречье, Кулойском плато, Тимане).

Роль многолетней мерзлоты в распределении коэффициентов подземного стока очень заметна. На огромных пространствах Сибири и северо-востока России, где выпадает до 300–400, а местами до 500–600 мм атмосферных осадков, коэффициенты подземного стока весьма незначительны – 5%, и только на юге Сибири (Северное Прибайкалье и отроги Верхоянского хребта), где многолетняя мерзлота приобретает островной характер, а годовое количество осадков увеличивается до 800 мм, коэффициенты подземного стока достигают 15–20% и более.

Важной характеристикой являются значения коэффициентов подземного питания рек, которые показывают долю подземного стока в общем речном стоке и позволяют определить, таким образом, соотношение ресурсов подземных и поверхностных вод во многих районах гумидной зоны.

В среднем коэффициент подземного питания рек составляет 24%, изменяясь от 5–10% в районах с относительно небольшой мощностью зоны интенсивного водообмена, слабо расчлененным рельефом и благоприятными условиями образования поверхностного стока, до 40–50% и более в районах, сложенных весьма водообильными породами, интенсивно дренируемыми реками.

В распределении значений коэффициентов подземного питания рек на территории Центральной и Восточной Европы четко проявляется влияние географической зональности и высотной поясности основных природно-климатических факторов. На севере (Карело-Кольский регион, бассейн р. Печоры) коэффициенты подземного питания рек изменяются от 10 до 30%. Здесь в условиях относительно малой расчлененности местности и неглубокого залегания грунтовых вод создаются весьма благоприятные условия для формирования поверхностного и склонового стока. На участках развития карста (Онего-Северо-Двинский водораздел, Кулойское плато) отмечаются локальные повышения доли подземного питания рек (до 35–40%).

В центральной части Русской платформы коэффициенты подземного питания рек достигают 40–50%. Здесь благоприятные условия подземного питания рек в этой зоне обусловлены наличием более мощной зоны интенсивного водообмена подземных вод и ее высокой дренированностью гидрографической сетью.

Южнее этой зоны участие подземных вод в формировании речного стока резко снижается, коэффициенты подземного питания рек уменьшаются до 10–15% и менее, а в аридных зонах, где в балансе подземных вод преобладает испарение, подземный приток в реки практически отсутствует [23, 24].

Горные области характеризуются более высокими значениями коэффициентов подземного питания рек, чем прилегающие к ним равнины. В пределах горно-складчатых областей Центральной и Восточной Европы доля подземного притока в реки достигает 70–80%. В целом для большинства горных рек преобладающие значения коэффициентов их подземного питания составляют 40–60% при значительных колебаниях их крайних значений (например, в пределах Большого Кавказа доля подземного притока в горные реки изменяется от 2–5 до 70–75%).

Анализ соотношений подземного стока и общего речного стока приобрел большое практическое значение в проблеме комплексного использования водных ресурсов при составлении водохозяйственных балансов отдельных регионов и оценке влияния эксплуатации подземных вод на речной сток.

В последние десятилетия широкое развитие получили региональные исследования подземного стока в моря и океаны, которые являются составной частью комплексной гидролого-гидрогеологической проблемы изучения подземного водообмена суши и моря [10].

Значительным толчком к постановке и развитию исследований подземного стока в моря в последние годы послужили запросы практики по «проблеме внутренних морей». Сущность этой проблемы состоит в том, что во многих внутренних морях (прежде всего Каспийском и Аральском) и крупных озерах происходят значительные изменения уровня воды, обусловленные как естественными факторами, так и интенсивной хозяйственной деятельностью на водосборах. Встала задача изучения современного и перспективного водного и солевого балансов этих водоемов и, следовательно, оценки роли подземных вод в формировании них балансов. К настоящему времени накоплен значительный опыт исследований по количественной оценке подземного стока во внутренние и окраинные моря и крупные озера.

Основная задача этих исследований – изучение особенностей и закономерностей процессов водно-солевого обмена водоема с сушей, а также обоснование прогноза изменений подземной составляющей водного баланса под влиянием все возрастающей хозяйственной деятельности.

Подземный сток в моря – важный показатель ресурсов подземных вод. В приморских районах недостаток в пресной воде хорошего качества в ряде случаев можно значительно уменьшить или даже покрыть полностью за счет использования подземных вод, которые в настоящее время «бесполезно» стекают в море. В некоторых странах уже имеется положительный опыт использования вод крупных субмаринных источников, разгружающихся в море недалеко от берега, а также опыт эксплуатации скважин, пробуренных на шельфе и вскрывших пресные подземные воды для водоснабжения приморских населенных пунктов.

В последние годы отечественными специалистами разработаны методологические основы региональной оценки подземного стока в моря, океаны и крупные озера, подробно рассмотренные в специальной литературе [10, 11, 37, 38].

Изучение и оценка перспектив использования подземных вод трансграничных водоносных горизонтов для водоснабжения и орошения прилегающих территорий

Оценка условий формирования и перспектив использования пресных подземных вод трансграничных водоносных горизонтов является сравнительно новым разделом региональной гидрогеологии. Как известно, в последние годы проблема использования трансграничных вод приобрела для многих стран особую актуальность. Причем это относится не только к межгосударственным границам, где вопросы использования пограничных или трансграничных (пересекающих границ) рек во многих случаях регулируются специальными международными соглашениями. В качестве примеров можно привести соглашения между Россией и Китаем об использовании вод р. Амур, соглашение между правительством России и Эстонии о сотрудничестве в области охраны и рационального использования трансграничных вод и другие международные договоренности. Важное значение имеет «Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер»,

принятая в Хельсинки в 1992 г. В ней подчеркивалась необходимость разработки единых принципов межгосударственной охраны и использования трансграничных водных объектов, включая поверхностные и подземные воды на основе специальных соглашений между странами.

Проблема регулирования использования трансграничных вод стоит весьма остро и внутри отдельных стран (США, Австралия, Россия, Индия и другие), где отдельные административные регионы (штаты, округа, федеральные подразделения) имеют конституционную самостоятельность и многие вопросы использования природных ресурсов решают практически самостоятельно, лишь согласовывая с соседями или федеральными органами основные принципиальные законополагающие акты. Например, в Австралии в каждом штате имеются специальные комиссии по водным ресурсам штата, которые выдают разрешения на использование воды (включая бурение артезианских скважин) и организацию научно-исследовательских и проектных работ, определяют пределы допустимого изъятия воды на те или иные нужды штата и осуществляют контроль за качеством воды и уровнем загрязнения.

Следует отметить, что проблемы использования и охраны трансграничных рек решаются несколько легче, чем использование трансграничных горизонтов подземных вод. Это связано с тем, что большинство стран имеет хорошую сеть наблюдений за расходом и качеством речных вод, а в ряде стран на границе оборудованы специальные гидрометрические станции, постоянно измеряющие расход и состав речной воды в автоматическом режиме. В этих случаях количество и качество воды, которые надо сохранить для соседнего государства регламентируются и контролируются в соответствии с существующими международными соглашениями.

Значительно сложнее обстоит дело с изучением и использованием подземных вод трансграничных водоносных горизонтов. В настоящее время опыт региональной оценки ресурсов и качества трансграничных водоносных горизонтов, включая прежде всего оценку перспектив и допустимых пределов их возможного использования, крайне ограничен, несмотря на то, что такие трансграничные горизонты имеются почти во всех странах (за исключением островных государств).

После распада Советского Союза проблема изучения трансграничных водоносных горизонтов в России, имеющей сухопутные границы с 13 суверенными странами, стала весьма актуальной. В настоящее время необходимо разработать научно-обоснованные принципы оценки использования и управления ресурсами подземных вод в пограничных районах России с обязательным соблюдением природоохранных требований. Эти принципы должны включать как разработку региональных постоянно действующих гидродинамических моделей системы взаимосвязанных водоносных горизонтов, так и оценку риска загрязнения подземных вод при их современном и перспективном использовании.

Можно выделить следующие конкретные задачи изучения и использования трансграничных водоносных горизонтов:

- количественная оценка естественных и эксплуатационных ресурсов пограничных и трансграничных водоносных горизонтов. Методика региональных оценок основана на гидродинамических расчетах, включая региональные модели расходов подземных потоков и возможной производительности водоносных горизонтов и крупных водозаборов подземных вод;
- определение химического, биологического и радионуклидного состава подземных вод и допустимого уровня их изменений;
- оценка уязвимости пресных подземных вод трансграничных водоносных горизонтов к техногенному загрязнению с поверхности земли;
- научно-методическое обоснование межгосударственных соглашений о допустимых пределах использования подземных вод трансграничных водоносных горизонтов, включая прежде всего геоэкологические аспекты, допустимые уровни отбора подземных вод, опасность загрязнения и истощения водоносных горизонтов;
- разработка совместного межгосударственного мониторинга использования и охраны подземных вод трансграничных водоносных горизонтов.

Первый положительный опыт региональных исследований современного состояния и перспектив использования трансграничных водоносных горизонтов, выполненных совместно российскими и эстонскими специалистами [20] показал реальную возможность

решения указанных задач. В настоящее время Институтом водных проблем РАН совместно с национальными академиями Украины и Казахстана начаты региональные исследования трансграничных водоносных горизонтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусова А.П. Ресурсы подземных вод и их защищенность от загрязнения в бассейне реки Днепр и отдельных его областях: Российская территория. М.: ЛЕН АНД, 2005. 168 с.
2. Белоусова А.П., Галактионова О.В. К методике оценки естественной защищенности подземных вод от радиоактивного загрязнения // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. №3. С. 340–345.
3. Всеволожский В.А. Подземный сток и водный баланс платформенных структур. М.: Недра, 1983. 167 с.
4. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
5. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
6. Зеегофер Ю.О., Ключкин А.Н. и др. Постоянно действующие модели гидrolитосферы территорий городских агломераций. М.: Наука, 1991. 198 с.
7. Джамалов Р.Г. Подземный сток Терско-Кумского артезианского бассейна. М.: Наука. 1973. 95 с.
8. Зекцер И.С. Естественные ресурсы пресных подземных вод Прибалтики. М.: Недра, 1968. 105 с.
9. Зекцер И.С. Закономерности формирования подземного стока и научно- методические основы его изучения М.: Наука, 1977. 173 с.
10. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г., Мехетели А.В. Подземный водообмен суши и моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 208 с.
11. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г. Подземные воды в водном балансе крупных регионов. М.: Наука, 1989. 124 с.
12. Зекцер И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Научный мир, 2001. 327 с.
13. Информационный бюллетень. О состоянии недр на территории Российской Федерации в 2005 г. М.: 2006. Вып. 29.
14. Карта подземного стока СССР в процентах от общего речного стока и коэффициентов подземного стока в процентах от осадков. Масштаб: 1:5 000 000. М.: ГУГК, 1964.
15. Карта подземного стока СССР. Масштаб: 1:5 000 000. М.: ГУГК, 1964.4 л.
16. Карта подземного стока территории СССР. Масштаб: 1:2 500 000. М.: ГУГК, 1974. 12 л.
17. Карта подземного стока Центральной и Восточной Европы. Масштаб: 1:1 500 000. М., 1983. 16 л.
18. Куделин Б.Н. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: МГУ, 1960. 344 с.

19. Лебедева Н.А. Естественные ресурсы подземных вод Московского артезианского бассейна. М.: Недра, 1972. 148 с.

20. Миронова А.В., Мольский Е.В., Румынии В.Г. Трансграничные проблемы при эксплуатации подземных вод в районе государственной границы Россия – Эстония (на примере Ломоносовско-Воронковского водоносного горизонта) // Водные ресурсы, 2006. Т. 33. №4. С. 423–432.

21. Никитин М.П. Классификация гидрогеологических карт и принципы отраслевого гидрогеологического картографирования на примере серии карт подземных вод повышенной минерализации. М.: Наука, 1974. С. 10–23.

22. Новоселова Л.П. Анализ методов гидрогеологического картографирования // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. №6. С. 661–667.

23. Подземный сток с территории СССР. М.: МГУ, 1966. 303 с.

24. Подземный сток Центральной и Восточной Европы. М.: Недра, 1982. 288 с.

25. Хубларян М.Г., Путырский В.Е., Фролов В.П. Математическое моделирование взаимодействия поверхностных и подземных вод // Водные ресурсы. 1987. №4. С. 31–40.

26. Шустопалов В.М. Естественные ресурсы подземных вод платформенных артезианских бассейнов Украины. Киев.: Наукова думка, 1981. 196 с.

27. Язвин Л.С. Гидрогеологические исследования для обоснования рационального использования подземных вод с целью хозяйственно-питьевого водоснабжения Московского региона // Геол. Вестник Центральных районов России. 1998. №1. С. 7–12.

28. Язвин Л.С., Зекцер И.С. Изменение ресурсов подземных вод под влиянием техногенной деятельности // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. №5. С. 517–523.

29. Albinet M., Margat G. Cartographie de la vulnerabilitee la pollution des neppes d ean souterraine. Orleans, France, Bull. BRGM, 2eme serie, section 3, 1970. №4. P. 13–22.

30. Aller L. et al. DRASTIC: a standarde zed system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. V.S. Env. Protections Agency, Ada. OK, EPA \ 600W2-87-036, 1987, 455 p.

31. Ground Water. Atlas of the United States, Reston, Virginia, 1992.

32. Hydrogeologic map of China, 1:4 000 000. China Cartographic Publ. House, 1980.

33. Margat G. Vulnerabilite des mappesa d eau souterraine a la pollution. (Groundwater vulnerability to contamination). Bases de la cartographic. BRGM. 1968. Orleans France.

34. Zektser I.S., Belousova A.P., Dudov V.Yu. Regional assessment and mapping of ground water vulnerability to contamination. Environmental Geology. 1995. Vol. 25, №4, pp. 225–231.

35. Zektser I.S. Groundwater and the Environment. Lewis Publ., 2000. USA, 175 p.

36. Zektser I.S., Dzhamalov R.G. Role of ground water in the hydrological cycle and the continental water balance. UNESCO International Hydrological Programme, Paris, IHP-III Project 2.3 Technical Documents in Hydrology. UNESCO, Paris, 1988. 133 p.

37. Zektser I.S., Dzhamalov R.G. Submarine Ground water. CRC Press. USA, 2007, 466 p.

38. World man Hydrogeological conditions and Groundwater flow scale 1:10 000 000 USA. 1999.

Калинин Геннадий Павлович

(3.11.1916 2.1.1975)



Геннадий Павлович Калинин – выдающийся учёный, крупнейший специалист в области гидрологического прогнозирования, разработки и применения математических моделей формирования речного стока и геофизических методов, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент АН СССР, лауреат Государственной премии СССР.

Г.П. Калинин родился 3 ноября 1916 г. в г. Баку, в семье учителей. В 1937 г. окончил Харьковский (ныне Одесский) гидрометеорологический институт.

Склонность и способности к исследовательской и педагогической работе проявились в самый ранний период его научной деятельности в Государственном гидрологическом институте (1937–38 гг.), которая в дальнейшем включала следующие основные направления: региональные и глобальные исследования водообмена, расчёты элементов водного баланса; разработку методов расчёта и прогноза режима вод суши и внутренних морей; исследование процессов формирования режима вод суши, моделирование геофизических процессов.

В 1938–1942 гг. Геннадий Павлович был аспирантом, преподавателем и заведующим кафедрой гидрологии и водных исследований Харьковского гидрометеорологического института. К этому периоду относятся его первые опубликованные работы, посвящённые водному балансу и прогнозам стока, до сих пор не утратившие актуальности и методологической ценности. В 1940 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Главнейшие климатические факторы годового стока».

В 1941 г. вышла в свет монография «Прогноз уровня Каспийского моря», в которой Геннадий Павлович изложил новые оригинальные методы, положенные в основу долгосрочных прогнозов при решении сложной и исключительно важной проблемы Каспия. В дальнейшем круг его деятельности в гидрологической и других гидрометеорологических науках значительно расширился, однако с этой актуальной проблемой он был связан всегда и внёс неоценимый вклад в её решение.

Во время Великой Отечественной войны (1942–43 гг.) Геннадий Павлович участвовал в обеспечении фронта гидрологическими данными и прогнозами; в 1943–61 гг. – начальник отдела и заместитель директора Центрального института прогнозов (ныне Гидрометеорологический центр РФ). Эти годы он посвятил изучению и развитию методов гидрологического прогнозирования и, по существу, создал школу гидрологических прогнозов. Его исследования отличались новизной, высоким теоретическим уровнем, научной корректностью, использованием современного математического аппарата и геофизических методов, широкими географическими обобщениями и совершенно определённой практической направленностью. В 1952 г. Г.П. Калинин защитил диссертацию «Основы методики краткосрочных прогнозов водного режима рек» на соискание учёной степени доктора географических наук.

Г.П. Калинин разработаны принципиальные основы прогнозов речного стока по данным о процессах, происходящих в речной сети и на поверхности водосбора, а также пользующиеся широкой известностью методы расчётов движения водных масс в условиях неустановившегося режима. Его по праву можно считать основоположником использования математических моделей формирования стока для гидрологических прогнозов с применением аналоговых и цифровых ЭВМ. Им опубликовано более 200 научных работ, в том числе 8 монографий и учебников. Результаты теоретических исследований и разработанных Геннадием Павловичем методов широко используются на практике научно-исследовательскими и проектными организациями, прогностическими органами Гидрометеослужбы России и многими зарубежными учреждениями.

Г.П. Калинин выполнял большую педагогическую работу: с октября 1961 г. – профессор, с марта 1963 г. – заведующий кафедрой гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Как педагог и крупный учёный Геннадий Павлович был тесно связан с гидрологическими кафедрами университетов, гидрологических институтов и других вузов России. Геннадий Павлович – один из авторов основного курса по гидрологическим прогнозам, принятого в качестве учебника во всех высших учебных заведениях страны, готовящих гидрологов, и переведённого на английский, немецкий и другие языки.

Геннадий Павлович был очень щедрым учёным, охотно делившимся своими новыми оригинальными идеями с коллегами и учениками, которых у него всегда было много. Более 30-и его воспитанников защитили диссертации, многие последователи его школы стали создателями собственных научных школ (Л.С. Кучмент, В.М. Евстигнеев, В.И. Корень, В.А. Жук и другие). Работы Г.П. Калинина создали принципиально новые направления по геофизике гидросферы. На кафедре гидрологии МГУ под руководством Геннадия Павловича проведены большие научно-методические работы, на факультете созданы проблемные лаборатории по изучению водохранилищ, взаимодействия поверхностных и подземных вод, организованы Международные курсы по повышению квалификации гидрологов и гидрогеологов.

Г.П. Калинин был одним из инициаторов создания Института водных проблем АН СССР, где работал с 1968 г., практически с начала его деятельности. Геннадий Павлович организовал исследования в новой для того времени области глобальной гидрологии; незаурядные способности учёного-организатора позволили ему объединить для этой цели усилия коллективов гидрологов различных учреждений.

В вышедшей в свет в 1968 г. книге «Проблемы глобальной гидрологии» Геннадий Павлович обобщил многолетние фундаментальные исследования по общим и региональным закономерностям формирования речного стока. В этой работе, кроме расчётов стока, рассмотрены также проблемы глобального влагооборота и многолетних колебаний уровня озёр, а также вопросы будущего состояния водных ресурсов СССР и США. Практические рекомен-

дации по расчётам глобальных и региональных изменений водного режима поверхностных вод суши, приведённые в книге, широко используются для оценки будущего состояния режима рек, озёр и водохранилищ с учётом влияния водохозяйственных преобразований. Результаты исследований Геннадия Павловича по вопросам асинхронности распределения стока по регионам и в глобальном масштабе легли в основу методологии оптимального комплексного использования водных ресурсов. За эту монографию Г.П. Калинин был удостоен Ломоносовской премии Московского университета.

В последние годы жизни Г.П. Калинин начал развивать новейшие методы гидрологических исследований, основанные на данных спутниковых наблюдений. Опубликованная им в 1974 г. книга «От аэрокосмических снимков к прогнозам и расчётам стока» (перепечатанная в настоящем сборнике) является образцом научного творчества, она поражает новизной идей и глубиной замысла, сулящего огромные возможности в области изучения и рационального использования водных ресурсов.

Г.П. Калинин был почётным членом Венгерского гидрологического общества, действительным членом МГД Международного географического союза, вице-президентом комитета математического моделирования в гидрологии Международного союза геодезии и геофизики, возглавлял комиссию междуведомственного Геофизического комитета при АН СССР, был председателем гидрологической комиссии Московского географического общества и др.

Награждён медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (1951 г.), «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (1945 г.) и «В память 800-летия Москвы» (1947 г.). Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 5 ноября 1982 г. Геннадий Павлович в составе авторского коллектива был посмертно удостоен Государственной премии СССР за монографию «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли», изданную в 1974 г.

Имя Геннадия Павловича Калинина неразрывно связано с самыми крупными успехами в развитии гидрологической науки середины 20 в. Он обладал огромным личным обаянием, доброжелатель-

ностью, умением разгадать и развить творческие способности своих сотрудников. Г.П. Калинин создал научную школу математического моделирования в гидрологии, успешно развивающая его начинания.

*А.Н. Гельфан (ИВП РАН),
В.А. Широкова (ИИЕТ РАН),
М.И. Степанова (ИВП РАН)*

От аэрокосмических снимков к прогнозам и расчетам стока¹

Г.П. Калинин

Введение

Перспективы развития гидрологии в связи с выходом человека во внеземное пространство определяются уровнем развития этой науки, ее способностью ставить и решать новые задачи, наиболее эффективно используя современные и предвидимые возможности новой системы изучения природы. В настоящее время появились следующие важнейшие проблемы гидрологии:

- выяснение процессов эволюции природных вод, приведших к современному их состоянию как на Земле, так и в космосе;
- развитие новых методов изучения динамики поверхностных, почвенных и подземных вод в различном фазовом состоянии.

Актуальность первой проблемы очевидна из того особого положения, которое занимает, в отличие от других планет, водная оболочка на Земле, в конечном итоге являющаяся одним из главных условий развития жизни. Основным является установление причин, определяющих соотношение между приходом на поверхность планет влаги из их недр и расходом ее в космическое пространство. Сложность решения этой проблемы заключается не только в том, что имеет место влияние различия в массах планет и их расстояния от Солнца, но в первую очередь весьма небольшой, трудно поддающийся даже приближенной оценке процесс прихода воды на поверхность Земли и водообмен с космосом.

Весьма вероятно, что создававшаяся в какой-то период развития Земли возможность появления воды сначала на небольшой ее части способствовала возникновению биосферы, что, в отличие от других планет, привело к трансформации газового состава ее атмосферы и образованию «экрана», замедлившего вынос воды в космос и создавшего условия для ее пополнения на земной поверхности.

Создававшаяся в процессе эволюции Земли стратосферная ловушка (связанная с присутствием здесь озона) паров воды, препятствующая их диффузии вверх, представляет весьма тонкий механизм,

¹ Калинин Г.П. От аэрокосмических снимков к расчетам и прогнозам стока. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 40 с.

который возникает в очень ограниченном диапазоне физических условий, так как из всех других планет солнечной системы в такой форме он, видимо, функционирует только на Земле. Актуальность изучения этого механизма усиливается тем, что при интенсивном вмешательстве человека в жизнь природы не исключена возможность возникновения условий, приводящих к его нарушению.

Получение новых данных о распределении воды и факторов ее образования в космическом пространстве и на планетах, изучение их водообмена будут способствовать решению этой проблемы.

Что же касается второй проблемы, то здесь намечается ряд разделов гидрологической науки, заинтересованных в развитии дистанционных методов исследования. К ним, в частности, относятся:

- расчеты и прогнозы формирования стока;
- загрязнение водоемов;
- термика водоемов и ледовый покров;
- динамика снежного покрова и ледников;
- влагозапасы атмосферы и почвы;
- уровни подземных вод, выход подземных вод в озера, моря и океаны;
- эрозия почвы и берегов, структура современной и древней речной сети и др.

Даже этот неполный перечень свидетельствует о большом интересе к дистанционным методам исследований. Однако большинство работ, посвященных такого рода исследованиям, в основном носит частный характер или лишь фиксирует особенности того или иного явления на фотоизображениях. В связи с этим теоретический анализ и практическое использование новой информации далеко не соответствуют имеющимся возможностям. В настоящее время нет недостатка в общих рассуждениях о пользе дистанционных методов. Однако в практическом их применении успехов значительно меньше, чем следовало бы ожидать. Поэтому, уже отдав во введении дань общим рассуждениям, в дальнейшем сосредоточим внимание на разработке конкретных методов использования дистанционных наблюдений в наиболее близкой автору области – методике прогнозов и расчетов стока.

В настоящее время имеются возможности создания новой, более точной системы прогнозов гидрологических процессов, опираю-

щейся как на логику развития гидрологии, так и на новые способы получения и виды информации. Чтобы более убедительно показать практическую реальность выдвигаемых предложений, автор сознательно в той мере, в какой это представлялось возможным, избегает дискуссионных вопросов и максимально использует в качестве составных элементов расчетные компоненты тех методов прогноза, которые уже прошли многолетнюю апробацию.

Чем интенсивнее развивается та или иная отрасль науки о природе, тем больше требований она предъявляет к постановке новых наблюдений и повышению их точности. Поэтому вполне закономерным является и то, что в данной работе предъявляется много требований в части постановки новых экспериментальных работ и наблюдений.

Основные положения настоящей работы могут быть сведены к следующему.

- Хотя объектами исследований гидрологии суши являются процессы формирования вод на поверхности Земли, главным источником информации были только точечные наблюдения гидрометстанций, которые из-за ограниченности охвата территории не могут дать достаточно полного представления о динамике изучаемых процессов. Непосредственные наблюдения за динамикой гидрологических процессов на территории различного масштаба могут существенно улучшить изученность рассматриваемых процессов и точность их расчетов.
- Общепринятая теория формирования стока в сочетании с некоторыми эмпирическими данными позволяет по материалам наблюдений получить переходные функции от точечных гидрометеорологических наблюдений к стоку. Так называемая генетическая формула стока имеет столь общий характер, что в принципе (с известной модификацией) может быть применима и к новой информации, получаемой по фотоснимкам.

Это позволяет широко использовать уже известный аппарат для решения большого круга гидрологических задач с привлечением качественно новой информации.

- Связь площадей затопления (поверхности бассейна, овражно-балочной и речной сетей) и протяженности сети временных водотоков с гидравлическими характеристиками этих элементов лан-

дшафта, а также стоком воды с ним близка к функциональной. Хотя структура этих связей еще не полностью раскрыта, однако, используя обширный опыт решения обратных задач, принципиально можно их установить, опираясь на анализ материалов наблюдений.

- Различные размеры упомянутых характеристик заполнения поверхности водосборов, а также овражно-балочной, речной сетей позволяют использовать в расчетах в зависимости от разрешающей способности аппаратуры тот или иной исходный материал наблюдений. Это придает большую гибкость возможностям использования снимков при условии, что будет разработана система способов прогнозов и расчетов, позволяющая опираться по мере необходимости на те или иные разномасштабные изображения земной поверхности.
- Сток с поверхности бассейна в конечном итоге представляет собой разность между осадками и потерями стока. Эти элементы, в особенности потери стока, по ряду известных причин определяются весьма грубо, что приводит к большим погрешностям в прогнозах и расчетах. Вместе с тем получаемые по снимкам площади покрытости поверхности бассейна водой можно представить как следствие трансформации упомянутой разности осадков и стока. Это создает предпосылки для того, чтобы избежать в прогнозах и расчетах столь грубых характеристик и в качестве исходных данных использовать более непосредственные факторы стока. В частности, следует подчеркнуть уникальность такой характеристики, как площадь затопления поверхности бассейна, являющейся одновременно показателем питания поверхностных и подземных вод.
- Изложенное создает принципиальную возможность перестройки современной системы прогнозов и расчетов на другую, логически с ней связанную систему, но использующую новую информацию.
- Большая значимость новых возможностей прогнозирования будет стимулировать развитие новых экспериментальных исследований поверхности бассейнов, структуры водопроводящей сети; комплекса гидрологических процессов, в них происходящих. Особую роль здесь призваны сыграть экспериментальные

полигоны, которые должны предусматривать также наземные наблюдения, наблюдения со стационарных вышек (фотоизображения, радиоактивность Земли и др.), наблюдения с разновысотных самолетов и спутников.

Методические основы прогноза стока по аэрокосмическим снимкам площадей затопления поверхности бассейна и русловой сети

Наиболее легко определяются по дистанционным данным характеристики процессов, происходящих на поверхности бассейна (в частности, площади, занятые водной поверхностью).

С другой стороны, между площадями затопления и последующим стоком через замыкающий створ реки существует близкая к однозначной связь.

Таким образом, задача исследований прогнозов и расчетов стока дистанционными методами сводится:

- к установлению непосредственных зависимостей между площадями покрытия рассматриваемых элементов бассейна водной поверхностью и характеристиками стока;
- к установлению характерных размеров площадей покрытия водой при тех или иных гидрологических условиях;
- к определению в соответствии с разрешающей способностью аппаратуры точности измерения этих площадей или их интегральных характеристик дистанционными методами в настоящее время и в перспективе.

Первые две задачи целиком относятся к области гидрологических исследований. В последней роль гидрологии сводится к установлению требований к дистанционным исследованиям для решения гидрологических задач с необходимой точностью.

Как будет показано ниже, разнообразие процессов формирования стока и строгая последовательность их развития во времени создает весьма благоприятные предпосылки для широкого использования дистанционных методов.

Действительно, в первой фазе формирования стока после поступления воды на поверхность бассейна сразу же заполняются пониженные и малофильтрующие части бассейна, т. е. на поверхности бассейна образуется сеть проточных и непроточных микроозер. Кривая распределения площадей F бессточных и сточных мик-

роозер – это мало подверженная изменению во времени функция запасов воды на поверхности бассейна или склонового стока. Общая площадь, покрытая водой, может быть представлена как $F_{общ} = F(W)$ или $F_{общ} = \psi(q_{скл})$

Размеры и площади отдельных микроозер зависят от постоянных физико-географических условий (в первую очередь уклона) и переменных во времени условий стокообразования. Чем меньше размеры микроозер, тем их больше. Диапазон колебаний размеров микроозер очень велик: от долей квадратных метров до сотен квадратных метров и даже нескольких квадратных километров. При больших паводках размеры микроозер увеличиваются.

Площади покрытия поверхности бассейна микроозерами, измеренные дистанционно, могут характеризовать:

- общую для бассейна площадь микроозер, размеры которых превышают разрешающую способность аппаратуры;
- изменения отражательной способности за счет изменений общей площади зеркала воды микроозер.

Для отработки методики решения этих задач необходимо сочетание наземных и дистанционных наблюдений. В частности, заметим, что так как наполнение микроозер происходит синхронно и зависит от одних и тех же причин, то между общей площадью бассейна, покрытой водой, и площадью наиболее крупных затоплений должна быть тесная связь, конечно, индивидуальная для каждого бассейна.

Следует отметить, что чем меньше уклоны бассейна и чем больше интенсивность стока, тем размеры покрытых водой площадей бассейна будут больше. Отсюда следует, что наиболее благоприятные условия для прогноза стока при таком подходе имеются для высоких паводков равнинных бассейнов.

Одной из основных сложностей определения изменения во времени площадей покрытости бассейна водой является кратковременность этого процесса, который нередко измеряется часами или сутками, что требует соответствующей частоты измерений.

При частоте измерений природных ресурсов со спутников около двух раз в месяц нельзя проследить динамику площадей покрытия поверхности водосбора водой. Данные этих спутников можно использовать для оценки динамики влажности почвы, которая

меняется значительно медленнее. Для решения многих гидрологических задач частота производства измерения со спутника в отдельные фазы гидрологического режима должна быть такой же, как и с метеорологического спутника, а в некоторых случаях и большей.

Вторая фаза формирования стока заключается в поступлении воды в ложины и суходола.

В период паводков в суходолах формируются довольно значительные водные потоки, так как площадь водосборов суходолов обычно составляет 5–10 км² при сильной расчлененности рельефа и до 20–25 км² при слаборасчлененном рельефе. Процесс формирования стока является здесь более продолжительным, чем со склонов.

Следует отметить, что переход от одной фазы стока к другой растягивается на некоторое время.

Следующей фазой является последовательное формирование стока рек первого, второго и более высоких порядков. Исследованию структуры речной сети посвящен ряд работ – Р. Хортон [33], Н.А. Ржаницын [36], Л.Д. Курдюмов [29], Р.А. Нежиховский [21] и др.

В согласии с Р. Хортоном будем считать самый малый водоток, который не имеет притока, рекой первого порядка, реку, образующуюся в результате слияния двух рек первого порядка – рекой второго порядка и т. д.

Р. Хортоном были установлены следующие закономерности [33]:

$$N_0 = E_N^{\phi-0} \text{ и } \bar{L}_0 = \bar{L}_1 E_L^{0-1},$$

где N_0 – число притоков θ -го порядка в данном бассейне; ϕ – порядок главной реки; E_N – параметр, меняющийся от двух при плоском рельефе до четырех в горных районах; L_0 – средняя длина притоков каждого порядка; L_1 – параметр; E_L – параметр со средним значением 2–3.

Н.А. Ржаницыным [27] получены также и соотношения, позволяющие определять площади и длины рек.

Следует подчеркнуть значение масштаба карт. Так, водотоки, имеющие первый порядок на карте масштаба 1:10 000 000, на карте масштаба 1:100 000 имеют уже третий-четвертый порядок. Средняя длина притока первого порядка для Европейской части СССР по карте 1:1000 000 составляет 5 км, а по карте 1:25 000 всего 0,6 км.

Распределение рек различного порядка имеет общие черты для различных территорий.

В зависимости от разрешающей способности дистанционных измерений в качестве исходных элементов, для которых определяется площадь зеркала реки, должны браться реки тех или иных порядков, а следовательно, и различные по своим показателям и размерам характеристики поверхностного стока. Действительно, как упоминалось выше, для характеристик склонового стока могут приниматься или площади затоплений поверхности бассейна при размерах микроозер, превышающих разрешающую способность аппаратуры, или отражательная способность всей поверхности бассейна при покрытии поверхности бассейна мелкими микроозерами. Заполнение овражно-балочной и русловой сети характеризует площадь русловых и пойменных затоплений.

Следует иметь в виду, что дешифрованные космические снимки уже сейчас с успехом применяются для получения морфометрических характеристик и оценки режима рек. Проведенное по ряду районов эталонное дешифрирование космических снимков показывает, что на них практически отражается вся речная и озерная сеть [7]. При этом хорошая обзорность снимков позволяет изучить строение сети в целом.

Постоянные реки на этих снимках просматриваются даже при незначительных размерах рек (менее 10 км), русло отчетливо отражается во всех деталях. На космических снимках уверенно опознаются временные водотоки, имеющие вид светло-серых вытянутых, иногда извилистых полос. Значительно подробнее, чем на крупномасштабных картах, выделяются границы пойм рек, отмеченные общим потемнением тона. Поэтому (особенно при катастрофических наводнениях, характеризующихся большими разливами) использование космической и самолетной съемки может способствовать довольно высокой точности прогнозов.

Определение и прогноз поверхностного стока по площади покрытия поверхности бассейна водой

Между поверхностным притоком воды в речную сеть q и объемом воды W , находящейся на поверхности бассейна, существует близкая к функциональной связь

$$q=f(W). \quad (1)$$

С другой стороны, между площадью покрытой водной поверхности бассейна ω и W также имеется близкая к функциональной связь

$$W = \phi(\omega). \quad (2)$$

$$q = \psi(\omega). \quad (3)$$

Таким образом, для определения притока поверхностных вод в речную сеть нужно решить две задачи: найти долю площади бассейна, покрытой водой, и раскрыть форму связи между этой величиной и притоком воды в речную сеть.

Первая часть задачи решается аэрокосмическими методами или непосредственным определением площади, покрытой водой, или по средней отражательной способности поверхности бассейна. В последнем случае привлекаются предварительно установленные связи между этими изменениями и степенью покрытости площади бассейна водой.

Весьма перспективным для будущих исследований может оказаться определение и прогноз поверхностного стока по площадям, занятым почвой с различной степенью увлажнения. В настоящее время уже разработаны методики определения запасов воды в верхнем слое почвы при помощи самолетной гамма-съемки [24, 32].

Суждения о влажности почвы могут быть сделаны также по спутниковым изображениям в видимом диапазоне, причем для изучения регионального поля влажности достаточны даже сравнительно низкие пространственные разрешения, которые обеспечиваются элементом разложения телевизионных изображений порядка 1 км. В работе [6] показано, что существует весьма хорошая корреляция между альбедо почв различного увлажнения и плотностью негативного изображения, что позволяет определять влажность почвы по интенсивности сигнала телевизионного изображения.

Обнадеживающими для изучения дождевого паводка по спутниковым данным являются примеры уточнения контуров выпадения осадков и границ увлажнения почв по цветным фотографиям, полученным с ПКК «Джемини-4» [6].

Новые возможности для определения количественных характеристик влажности почвы открываются при использовании методов пассивной радиолокации в сантиметровом диапазоне. Согласно

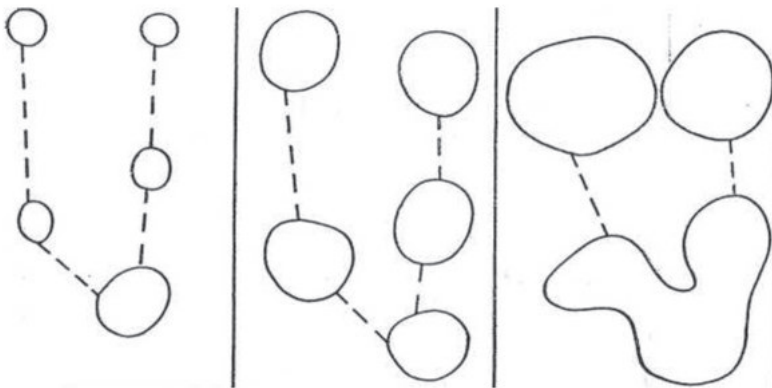


Рис. 1. Схема изменения покрытости бассейна водой при увеличении интенсивности стока

работам [4, 5, 9], по данным измерений микроволнового излучения на длинах волн 3,4 и 8,5 см установлено уменьшение радиояркостной температуры с увеличением влажности грунта, имеющее линейный характер. В последнее время появился ряд работ [9, 16, 17], в которых делаются попытки количественно определить влажность путем решения обратных задач нахождения физических параметров почвы по полю ее теплового излучения.

Наибольший интерес для целей гидрологического прогнозирования может представить оценка распределения количества воды в почве по глубине по данным измерения радиояркостных температур на длинах волн 0,81; 2,2; 6,0 и 21,4 см [42].

Вторая часть задачи может быть решена двумя путями и их сочетанием: первый из них заключается в теоретико-экспериментальном обосновании формы связи $q = \psi(\omega)$, второй опирается на решение обратной задачи – по наблюдениям за ω и q устанавливается $\omega(q)$. Для решения задачи первым путем, казалось бы, можно использовать теоретические построения для расчетов склонового стока, однако они в подавляющем большинстве случаев основываются на концепции сплошного склонового стока. Такой подход полезен для некоторых расчетных схем, но в данном случае он совершенно неприменим, так как решение в рассматриваемом методе основывается именно на условиях имеющего место в природе неполного покрытия бассейна водой (рис. 1). Поэтому большое

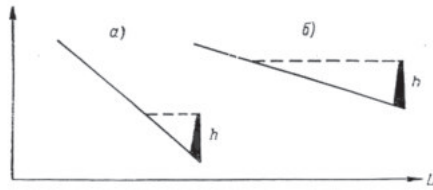


Рис. 2 Схема, иллюстрирующая изменение объемов воды на поверхности бассейна в зависимости от уклона при постоянной глубине: а – большой уклон; б – малый уклон

значение приобретает развитие теории, учитывающей несплошность формирования поверхностного стока и экспериментальное изучение строения поверхности бассейна и связанных с этим условий стока.

Здесь в первую очередь важно выяснить форму связи $q = \phi(\omega)$, некоторое значение имеет также установление кривой распределения емкости бессточных впадин, входящее как один из важных моментов в теоретическое построение. Рассмотрим сначала последнее.

Если представить себе склон с уклоном i , на котором имеется ряд лимитирующих сток углублений (рис. 2), то объем впадин на единицу ширины склона (при большом стоке) или объем на единицу ширины микроозера (при малом стоке) будет равен

$$W = H^2/2i \quad (4)$$

из (4) имеем

$$H = \sqrt{2iW}.$$

Если известна кривая распределения $f(H)$, то соответствующая ей кривая распределения объемов $\phi(W)$ выражается соотношением

$$\phi(W) = \frac{t}{H} f(H). \quad (6)$$

Отсюда видно, что даже при наличии близкой к симметричной нормальной кривой распределения глубин слоя воды $f(H)$ кривая распределения емкостей $\phi(W)$ резко асимметрична. С другой стороны, ясно, что при прочих равных условиях площадь, занятая водой, будет тем больше, чем меньше уклон. Можно предположить, что в ряде случаев закономерности, отмеченные выше, будут до некоторой степени справедливы и для объемов воды при переливе через отдельные возвышенности, так как слой переливающейся воды может быть значительно меньше H . Что же касается кривых

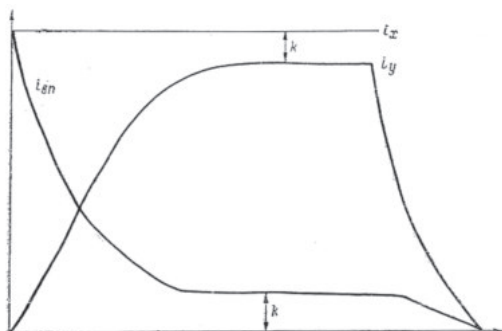


Рис. 3 Изменение во времени интенсивности осадков (i_x), интенсивности стока (i_y) и интенсивности впитывания (i_y)

распределения площадей ω , то они по своему характеру аналогичны кривым распределения H , так как площадь, приходящаяся на единицу ширины, равна

$$\omega = H/i$$

Общий приток воды в речную сеть может быть приближенно выражен соотношением

$$q = CSH^{1+2/3} i^{0,5}, \quad (8)$$

где C – параметр, зависящий от шероховатости склона; H – средняя глубина потока вблизи русловой сети; S – длина склона вдоль береговой линии.

Опираясь на данные Л.Г. Абрамова [1], в работе [13] была сделана попытка установить характер связи между q и W . Для этой цели в случае постоянной интенсивности выпадения осадков вычислялось впитывание воды по формуле Г.А. Алексева [2]

$$V_x = k + \frac{A}{\sqrt{t}}. \quad (9)$$

Параметр k устанавливался по интенсивности впитывания при длительном дождевании, когда уже происходила стабилизация расхода воды (рис 3).

Параметр $A_{i_{\max}}$ определялся из условия

$$\int_t^{t_{\max}} q dt = \int_0^{t_{\max}} (i_x - V_x) dt = \int_0^{t_{\max}} \left(i_x - \frac{A}{\sqrt{t}} - k \right) dt, \quad (10)$$

где t_{\max} – время от начала дождя до конца паводка.

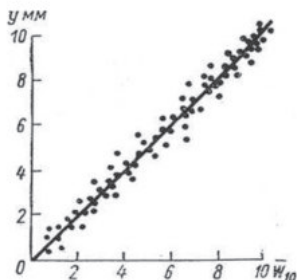


Рис. 4. Связь слоя стока с объемами воды, осредненными по 10-минутным интервалам времени

Величина текущих объемов воды W_t на поверхности склоновой площадки после установления параметров A и k определялась по соотношению

$$W_t = \int_0^t \left(i_x - y - \frac{A}{\sqrt{t}} - k \right) dt, \quad (11)$$

где y – сток в единицу времени, W_t – объем воды, отнесенный к единице площади.

Сопоставление полученных объемов при их осреднении по времени добегания τ от верховьев склона до сливного лотка показало наличие тесной линейной связи между q и W (рис. 4). Целесообразность введения осреднения (W_τ) вполне понятна, так как расход воды, согласно генетической формуле стока, состоит из объемов воды, поступивших в различное время на поверхность бассейна, что более точно отражается уравнением

$$q = \int_0^{\tau_{\max}} f(\tau) \varphi(W_{t-\tau}) dt, \quad (12)$$

где $f(\tau)$ – функция влияния (кривая добегания).

Это также вытекает, из известной последовательности во времени поступления осадков x , притока q , объема воды W и стока Q (рис. 5).

Действительно, даже малая площадь представляет собой огромную серию микробассейнов с некоторой аккумулирующей емкостью, создающей основную массу объемов воды, формирующих сток к сливному лотку. Здесь как бы в микромасштабе имеем процесс, аналогичный происходящему в последующем во всей речной сети. Близкая к линейной связь между объемами воды на склоне и

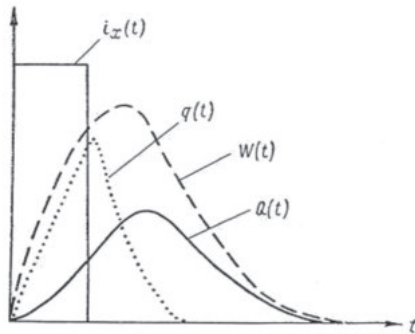


Рис. 5. Последовательность хода во времени интенсивности осадков (i_x), притока воды $q(t)$, объемов воды $W(t)$ и расхода воды через замыкающий створ $Q(t)$

расходом воды с него, вероятно, в значительной мере определяется близкими показателями степени в формулах (4) и (8). Так как между объемами воды и площадями покрытия бассейна водой связь нелинейная, то, вероятно, и связь притока воды с площадью покрытия бассейна имеет вид

$$q = A\omega^n, \quad (13)$$

где $n > 1$.

Мы сейчас вынуждены прибегать к некоторым гипотетическим выводам, потому что, несмотря на огромную важность для практики и развития теории формирования стока сведений о площадях покрытия водой и объемах воды, сейчас фактически не имеется данных таких наблюдений. Необходимо проведение на имеющихся стоковых площадках и в поле серии экспериментов, позволяющих осветить эти важные стороны процессов стока. Большую роль здесь наряду с наземными измерениями должно играть также систематическое фотографирование стокообразования на элементарных бассейнах с некоторой высоты. Впредь до накопления этих данных мы вынуждены ограничиваться некоторыми приближенными решениями. Как показал опыт гидрологических прогнозов, наиболее эффективные результаты можно получить путем решения обратных задач. В интересующем нас случае эти задачи, по существу, сводятся к следующему:

- определению по площади покрытия поверхности бассейна притока воды в речную сеть;

- определению по вычисленному притоку кривой добегания и стока в замыкающем створе. Используя существующие представления об условиях формирования стока, данные о площадях покрытости бассейна и стоке, а также опыт, накопленный в гидрологических прогнозах, можно решить эти задачи.

Действительно, пусть имеем серии наблюдений о динамике площадей покрытия водой и серию соответствующих данных о стоке паводков. Положим, что связь между q и ω можно выразить такими формулами

$$q = A\omega^n$$

или

$$q = \alpha\omega + \beta\omega^2. \quad (14)$$

Используем очевидное условие, что

$$\sum q = \sum Q, \quad (15)$$

где Q – ежедневные расходы воды, тогда

$$A\sum\omega_i^n = \sum Q_i, \quad (16)$$

или

$$a\sum\omega_i + b\sum\omega_i^2 = \sum Q_i.$$

Задаваясь в первом случае наиболее вероятными значениями параметра n , вычисляем $\sum\omega^n$. Затем между этими величинами и объемами паводков строим зависимость. В качестве расчетного принимается тот параметр n и соответственно A , которые дают наилучшие результаты. Технически несколько удобнее пользоваться формулой (14). Вычисляем для каждого паводка их объемы, а также $\sum\omega$ и $\sum\omega^2$. Строим зависимость

$$\sum Q = f(\sum\omega, \sum\omega^2), \quad (17)$$

по которой определяем параметры a и b .

Вторая задача расчетов (прогнозов) расходов сводится к расчету по генетической формуле стока

$$Q(t) = \int_0^{t=\tau_{\max}} f(\tau)q_{1-\tau} d\tau. \quad (18)$$

$$Q = a \int_0^{t=\tau_{\max}} f(\tau)\omega dt + b \int_0^t f(\tau)\omega^2 dt. \quad (19)$$

наиболее распространенными являются следующие формулы для расчета кривых

Подставляя вычисленные значения q в формулу (18), можем уже хорошо разработанными в гидрологии способами, в частности путем применения специализированных моделирующих устройств, легко определить кривую добегания и рассчитать расходы воды. Задача для прогнозов стока с неизученных бассейнов сводится к установлению параметров n и τ связи $q=\psi(\omega)$ на основе обобщения результатов наблюдений по ряду изученных бассейнов и последующему переносу этих зависимостей на неизученные.

Следует отметить, что во многих районах зоны избыточного увлажнения, где почвы обладают высокой инфильтрационной способностью, наблюдаются весьма специфические особенности формирования поверхностного слоя. В этих условиях сток обычно формируется после выхода подземных вод на дневную поверхность и заполнения ими микроуглублений. Для таких условий представляется возможным провести простое, но точное решение задачи о прогнозе (расчете) паводка.

Действительно, здесь сток (за вычетом пренебрежимо малых потерь на испарение во время дождя) численно равен стоку с территорий, покрытых водой

$$y = \omega i_x,$$

а коэффициент стока

$$\eta = \frac{\omega}{\omega_{\text{общ}}} i_x,$$

где y – слой стока в единицу времени; i_x – интенсивность дождя; ω , $\omega_{\text{общ}}$ – соответственно площадь, покрытая водой, и общая площадь водосбора.

Определение и прогноз поверхностного стока по площади зеркала условной сети

Свыше 90–95% всего стока формируется в результате его последовательного поступления через овражно-балочную и речную сеть в главную реку. Величина стока в русло главных и больших рек непосредственно с их склонов пренебрежимо мала. Поэтому, если бы мы имели некоторые контролируемые участки, позволяющие определять расходы перед поступлением стока из балок в речную сеть, то можно было бы с заблаговременностью, соответствующей времени добегания от устья балок до замыкающего створа реки, рассчитать сток последней. Однако непосредственное определение расходов

воды в этих притоках вызывает большие затруднения. Поэтому целесообразно определить среднее значение ширины этих притоков на некотором их протяжении перед впадением в последующие притоки. Известно, что между средней шириной каждого из этих притоков и его индивидуальным расходом существует близкая к однозначной связь. Это дает нам предпосылки для расчета суммарного расхода притоков рассматриваемой категории считать справедливым соотношение

$$q = f(\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_n), \quad (22)$$

где q – расход воды рассматриваемой категории притоков; $\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_n$ – соответственно средние ширины на некоторой длине выделенных притоков.

С другой стороны, как известно, расход в замыкающем створе может быть выражен формулой

$$Q(t) = \int_0^t q_{t-\tau} p(\tau) dt. \quad (23)$$

Здесь $q_{(t-\tau)}$ – суммарные расходы воды притоков рассматриваемой категории; $p(\tau)$ – кривая добегаания воды от рассматриваемых притоков до замыкающего створа.

Таким образом, задача сводится к раскрытию функции $q(\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_n)$, определению кривой добегаания и последующему интегрированию полученных соотношений. Наиболее сложной задачей является определение $q(\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_n)$.

Значительную помощь в раскрытии последней функции может оказать знание гидроморфометрической зависимости, изучению которой в гидрологии уделяется значительное внимание

Так, по Великанову:

$$\bar{B} = 5,6 \left(\frac{\bar{Q}}{\sqrt{qi}} \right)^{2/5}. \quad (24)$$

По С. И. Рыбкину, обработавшему большое количество материалов наблюдений, имеем

$$\bar{B} = 6,75 Q^{-0,57} k^{0,13} i^{-0,07}. \quad (25)$$

В этих формулах q – расход воды притоков; i – уклон;

$$k = Q_i / \bar{Q}.$$

В общем виде для того или иного района расход воды притоков может быть аппроксимирован в виде:

$$q = A\bar{B}^n, \quad (26)$$

где показатель степени в первом приближении 2, что в случае необходимости должно уточняться. Тогда приток воды может быть определен по соотношению

$$q = A\sum\bar{B}^2, \quad (27)$$

или

$$q = A\sum\bar{B}^n. \quad (28)$$

В случае если уклоны рассматриваемых притоков колеблются в широких пределах, расчет ведется аналогично изложенному с заменой (26) соотношением $q = A\sum\bar{B}^2 \cdot i^m$.

Сначала проверяем возможность расчета по соотношению (29) обычными методами и в случае необходимости применяем корректировку путем подбора параметров, наилучшим образом отвечающих исходным данным о стоке по формуле (30).

Весьма существенным при таком подходе является то обстоятельство, что предлагаемый метод в настоящее время может быть проверен с оценкой его точности по имеющимся материалам наблюдений.

Действительно, если рассмотреть бассейн с достаточно густой сетью гидрометрических станций, то по имеющимся уровням воды и связи их с шириной реки сможем определить $\sum\bar{B}^2$ и $\sum\bar{B}^n$. Имея в качестве входной функции $\sum\bar{B}^2(t)$ и $\sum\bar{B}^n(t)$, а в качестве выходной функции расходы воды $Q(t)$, используя специализированные моделирующие устройства (в частности, ПР-27, ПР-43, ПР-49), можно рассчитать кривую добегания и оценить точность прогнозов.

Весьма интересным и принципиально важным и новым показателем, удобным для дистанционного дешифрирования, могут стать данные о длине и количестве временных водотоков, образующихся в период образования паводков. Исследование динамики временной речной сети представляет самостоятельную интересную задачу.

С другой стороны, в связи с тем, что общая протяженность временных водотоков $\sum l$, образующихся на поверхности бассейна, является функцией притока $\sum l = \psi(q)$, эта суммарная характеристика может быть использована и для прогнозов стока с бассейна. Пре-

имущественное использование этой характеристики связано с тем, что линейные объекты более легко и точно дешифрируются на фотоснимках того или иного масштаба. В настоящее время, однако, неизвестны исследования, раскрывающие структуру связи между притоком воды с длиной временной речной сети.

Но мы в конечном счете можем иметь в качестве входной функции $\sum l(t)$, а в качестве выходной функции расходы воды в замыкающем створе $Q(t)$.

Тогда задача прогноза стока сведется к определению

$$Q(t) = \int_0^t \varphi(\sum l)_{t-\tau} p(\tau) d\tau. \quad (31)$$

Использование изменений не только временных водотоков, но и рисунка речной сети (ее протяженность) для оценки стока является весьма перспективным, так как по мере увеличения водоносности протяженность улавливаемых на фотоснимках участков речной сети (при прочих равных условиях) должна существенно увеличиться. Поэтому индикационные свойства речной сети могут быть полезными для оценки водности. В частности, следует отметить, что даже после прохождения паводков по затемнению долин рек могут быть установлены максимальные разливы и соответствующий им сток.

Определение русловых запасов и прогноз объема стока по площади зеркала речной сети

Методика прогноза по русловым запасам в настоящее время хорошо разработана [12, 28], однако при ее практическом применении встречается ряд затруднений, связанных как с недостаточным количеством материалов по морфометрии русел, так и со сравнительно редкой для решения этой задачи сетью гидрометеорологических станций.

После выпадения дождя в первую очередь увеличиваются объемы воды в мелкой речной сети, затем уже в средней и крупной речной сети. Через некоторое сравнительно непродолжительное время основная масса воды сосредоточивается в крупной и частично средней речной сети. Используя наблюдения со спутников или самолетов, можно определить динамику площади водного зеркала малых $\omega_1(t)$, средних $\omega_2(t)$ и крупных $\omega_3(t)$ рек.

Между объемами воды W и площадью зеркала воды существует довольно тесная связь. Далее нам известно, что сток воды $\sum Q$ за время, близкое периоду опорожнения всей или рассматриваемой части речной сети и соответствующее периоду заблаговременности прогнозов τ , определяется в основном русловыми запасами.

Действительно,

$$\sum_0^t Q = W_0 + \sum q, \quad (32)$$

где W_0 – начальный запас воды в речной сети; $\sum q$ – дополнительный сток через замыкающий створ от последующих дождей. Запасы воды определяются: $W_0 = \sum_0^t Q - \sum q$.

Исключив величину дополнительного притока обычными для гидрологии методами, получим ряд значений W_0 . Далее для периодов времени, когда вода в основном находится в крупной и средней русловой сети, строим зависимости

$$W_0 = f\left(\omega_3, \frac{\omega_2}{\omega_3}\right). \quad (33)$$

Кстати, отметим, что в связи со значительной коррелятивной связанностью ω_3 и ω_2 , представленная выше форма связи более удобна, чем $W_0(\omega_3, \omega_2)$.

Для периодов времени, когда значительная часть воды находится в руслах малых рек (ω_1), строим расчетную зависимости в виде

$$W_0 = f(W_{0\text{выч}}, \omega_1). \quad (34)$$

Здесь $W_{0\text{выч}}$ рассчитывается по соотношению (33).

Переход к систематической информации о площадях водного зеркала рек различной категории создает предпосылки для существенного уточнения прогнозов объемов стока.

Следует отметить, что, так как между площадью зеркала и объемом воды во многих случаях связь может не сильно отличаться от линейной, можно будет прийти к более простым соотношениям $W = f(\sum \omega)$ и $\sum Q = \phi(\sum \omega)$, где $\sum \omega$ представляет собой суммарную площадь рек всех категорий. Учет дополнительного притока $\sum q$ производится обычными методами.

Прогноз и расчет подземного стока на основе анализа динамики покрытости бассейна водой и влажности почвы

При выпадении осадков в течение длительного периода расход воды, вытекающей из колонки почвы в водоносные горизонты, согласно теоретическим обобщениям [18], имеет вид, изображенный на рис. 6.

С другой стороны, при отсутствии притока воды в водоносные горизонты уровень подземных вод и соответственно подземный сток снижаются по экспоненциальному закону (рис. 7).

Количество притекающей воды в водоносный пласт

$$q = \mu \frac{dH}{dt} + \mu \frac{dH_1}{dt}. \quad (35)$$

Здесь q – приток воды за время dt ; dH – приращение уровня воды водоносного пласта за время dt ; dH_1 – приращение уровня воды, рассчитанное по кривой спада; μ – эмпирический коэффициент, представляющий собой изменение количества воды в порах при колебании свободной поверхности относительно объема грунта. В супесчаных грунтах $\mu=0,1 \Rightarrow 0,15$, а в суглинках $\mu=0,014 \Rightarrow 0,10$.

Расход воды в источниках, гидравлически не связанных с уровнем реки, является функцией уровня подземных вод. Действительно, для случая, когда можно пренебречь испарением подземных вод, их расходование в период отсутствия притока в водоносные горизонты можно выразить соотношением

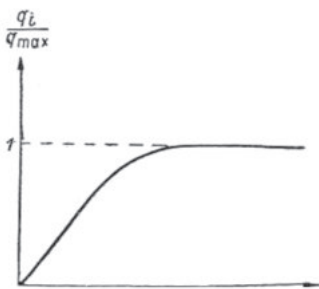


Рис. 6. Изменение во времени притока воды q в водоносные горизонты в долях от максимального притока q_{max} при постоянном увлажнении бассейна



Рис. 7. Кривая спада подземного стока

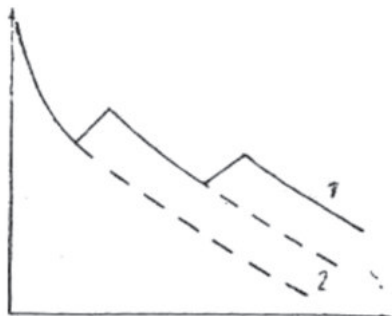


Рис. 8. Влияние притока воды в водоносные горизонты на трансформацию кривой спада подземного стока.
1 – трансформированная кривая спада, 2 – кривая спада без учета ее трансформации

$$\frac{dW}{dt} = \mu \frac{dH_1}{dt} = Q, \quad (36)$$

где Q – расход воды источника, отнесенный к единице площади водоносного пласта, питающего этот источник; W – переменный запас воды в водоносных пластах.

Несколько сложнее решается задача в период пополнения запасов подземных вод. Однако обычно за рассматриваемые короткие периоды времени питания водоносного горизонта положительное значение изменения уровня пренебрежимо мало по сравнению с глубиной водоносного горизонта и поэтому не может существенно изменить динамические характеристики потока. В связи с этим средний расход воды источников за время рассматриваемого повышения уровня можно считать по типовой кривой истощения, непрерывно трансформирующейся в результате притока воды и подземного стока по схеме, приведенной на рис. 8.

Если известен приток воды q , то, пользуясь балансовым методом и кривой спада расходов источника, можно рассчитать и ход расхода воды источника по кривым объемов. Действительно, объем воды водоносного горизонта, питающего источник, над некоторым уровнем воды, соответствующим какому-то произвольно взятому наименьшему возможному расходу воды, равен

$$W - W_{\min} = \int_{Q_{\min}}^Q Q(t) dt, \quad (37)$$

здесь $\int_{Q_{\min}}^Q Q(t) dt$ – площадь, ограниченная кривой спада (см. рис. 7) в интервале Q и Q_{\min} .

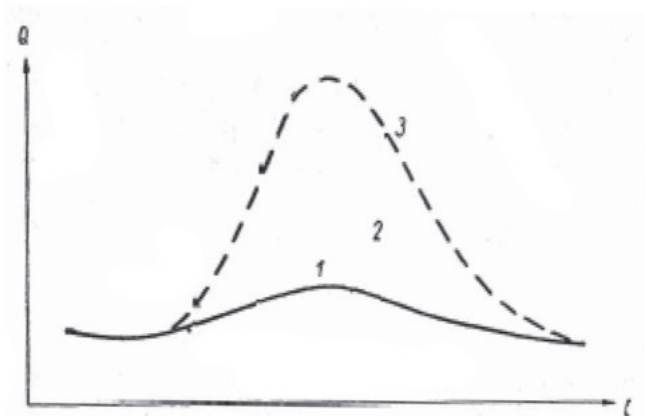


Рис. 9. Взаимосвязь поверхностных и подземных вод. 1 – подземный сток при условии отсутствия его взаимодействия с поверхностными водами; 2 – изменение подземного стока в результате его взаимодействия с поверхностным стоком; 3 – поверхностный сток

Зная расходы воды и соответствующий объем ($W - W_{\min}$), можно рассчитать кривую объемов ($W - W_{\min}$) $f(Q)$.

Ведя расчет по коротким интервалам времени, можно определить текущие объемы воды и соответствующие им расходы воды, так как кривая спада $Q_i = f(Q_{\text{нач}})$ может быть легко трансформирована в кривую $Q_i = f(W_i)$ или $Q_i = f(W - W_{\min})$.

Необходимые для таких расчетов объемы воды будем получать по соотношению

$$W_{t+\Delta t} = W_t + (q - \bar{Q}_t) \Delta t, \quad (38)$$

здесь $W_{t+\Delta t}$, W_t – соответственно объемы воды в моменты времени t и $t+\Delta t$; q – соответственно приток воды в водоносные пласты и расход источника за время Δt по кривой спада.

Расчеты подземного стока осложняются необходимостью учета его взаимодействия с поверхностным стоком и учета времени отекания подземных вод по русловой сети. Однако и здесь мы имеем некоторые обстоятельства, облегчающие условия расчета.

Действительно, как показано в исследованиях Б.И. Куделина [18], в течение паводка или половодья успевают закончиться период изъятия и пополнения подземного стока, причем по своим значениям эти две величины близки между собой (рис. 9).

Поэтому представляется целесообразным рассчитывать тот подземный сток, который бы имел место при отсутствии возмущающе-

го влияния паводков, рассматривая учет роли последних как самостоятельную задачу.

Что же касается времени добегания, то его можно определить, применяя хорошо разработанные в гидрологии методы изохрон, кривых добегания и т.д. Более того, учитывая значительно меньшую изменчивость подземного стока рек, чем поверхностного, в ряде случаев можно без больших погрешностей считать подземный сток равным средней величине притока в речную сеть за время руслового добегания.

К расчетам подземного стока в принципе можно применить такой же подход, как и к поверхностному, т.е. вести расчет по формуле Дюамеля

$$Q(t) = \int_0^{t=\tau_{\max}} q_{t-\tau} p(\tau) d\tau. \quad (39)$$

Здесь кривая добегания $p(\tau)$ могла бы рассматриваться исходя из анализа сочетания кривых спада подземного стока и кривой добегания по русловой сети. При более упрощенном решении

$$Q(t) = \int_0^{t=\tau_{\max}} \bar{q}_{t-\tau} p_1(\tau) d\tau. \quad (40)$$

Здесь $\bar{q}_{t-\tau}$ – осредненное по времени руслового добегания τ значение притока в водоносные горизонты; $p_1(\tau)$ – кривая добегания, рассчитанная по кривой спада подземного стока.

Рассмотренные подходы имеют то достоинство, что они раскрывают генезис подземного стока, так как показывают, из каких по времени его образования долей стока он состоит. Однако практическое применение этого способа затруднено тем, что расчеты по кривой добегания нужно вести на длительное время. Кстати отметим, что величину притока подземных вод q в принципе можно рассчитать по фактическому ходу подземного стока из уравнения, которое запишем в виде:

$$\bar{q}_{np} = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{\Delta t} + \bar{Q}_t. \quad (41)$$

Выше было показано, что в конечном счете задача расчета и прогноза режима подземных вод в первую очередь связана с необходимостью определения питания подземных вод. В свою очередь все процессы пополнения запасов подземных вод, поступающих через поверхность земли, происходят при накоплении воды на

поверхности бассейна, основной характеристикой которого мог бы быть ход во времени площадей покрытия бассейна водой. Другой важной характеристикой могла бы послужить влажность почвы, так как с ней непосредственно связана интенсивность просачивания воды в почво-грунты. Эти характеристики могут быть оценены по снимкам поверхности земли. Таким образом, дальнейшая задача заключается в непосредственном прогнозе по ним режима подземных вод.

Одной из предпосылок в рассматривавшихся ранее подходах к решению задачи прогноза поверхностного и подземного стока было стремление избежать трудно поддающихся обобщению характеристик, как, например, распределение коэффициентов фильтрации, гидравлично-морфометрических характеристик бассейнов, русел и пластов и т.д. Это удастся сделать путем введения таких интегральных характеристик процессов стока, как кривые спада, кривые добегания и т.д., определяемые по данным наблюдений и путем расчета. Кстати, отметим, что предлагаемые подходы могут оказаться весьма эффективными в мелиоративной гидрологии и гидрогеологии. Как известно, здесь важное значение для установления норм полива имеет расчет поверхностного стока, подземного питания и уровня подземных вод. Вместе с тем чрезвычайно разнообразие поливных борозд и степени их покрытия при различных условиях орошения не позволяют получить сколько-нибудь приемлемого решения упомянутых задач. Введение в расчет площади покрытости водой орошаемой территории, тесно связанной с величинами поверхностного стока и подземного питания, позволяет надеяться на получение более точного решения.

Исходные материалы для практического использования предлагаемых способов прогнозов и расчета

Исходные материалы можно разделить на три группы: наземные, самолетные и космические.

К наземным материалам относятся данные наблюдений за стоком в замыкающих створах; уровнями воды; топографические материалы, характеризующие площади поверхности воды в руслах и на поверхности бассейна, а также рельеф местности, почвы, растительный покров; кривые связи площади русел с уровнями; влажность почвы и др.

Часть указанных характеристик может быть получена с низко летающих самолетов, а также фотосъемкой с наблюдательных вышек.

Эти материалы могут быть использованы в нескольких целях, а именно:

- для отработки методики прогноза и расчета на некоторых бассейнах и стоковых станциях и установления влияния точности измеряемых элементов на погрешность прогноза;
- для выяснения зависимостей, необходимых при использовании дистанционных измерений, например, установления вида связи между площадью крупных скоплений воды на поверхности бассейна и общей площадью покрытия бассейна водой в различных физико-географических условиях;
- определения влияния физико-географических характеристик бассейнов на характер связи между измеряемыми факторами стока и величинами последнего для разработки метода перехода от изученных бассейнов к неизученным;
- использования этих материалов для дешифрирования снимков с космических летательных аппаратов и высотных самолетов;
- составления некоторых видов прогноза и особенно катастрофических наводнений (в частности, селей).

Разрешающая способность летательных аппаратов колеблется в весьма широком диапазоне – от 50 до 12 500 м [29]. Масштаб снимка m , как известно, определяется в первую очередь высотой фотографирования H и фокусным расстоянием съемочной камеры f .

Если не учитывать угол наклона снимка и кривизну земли, то $1/m=f/H$

Для рассмотренных целей главное значение будут иметь летательные аппараты с низкими орбитами и частично средними орбитами, которые смогут обеспечить высокую точность наблюдений рассматриваемых выше малых объектов.

Разрешающая способность сканирующей многоспектральной системы MSS и телевизионной системы RBV спутника ERTS-I при числе строк разложения 6000 приближается к разрешению, получаемому пилотируемыми космическими кораблями с более низких высот.

Одной из наиболее сложных проблем получения надежных аэрокосмических снимков в любое время является исключение влияния

Таблица 1

Измеряемая характеристика	Диапазон характерных размеров
Доля площади бассейна, покрытой водой	1000–30 000 км ² (бассейн)
Площади увлажнения	1000–30 000 км ² (бассейн)
Площади отдельных микроозер	От нескольких кв. метров до нескольких кв. километров
Ширина водного зеркала овражно-балочной сети	10–30 м
Площадь водного зеркала речной системы	Длина рек: 10–300 км, ширина рек: 50–3000 м
Длина временных водотоков	1–3 км

облачности и растительности². Весьма перспективным в целях исключения влияния облачности являются поисковые исследования измерений в радиодиапазоне (сантиметровом). При исследованиях в радиодиапазоне либо земная поверхность должна облучаться радиоволнами установленного на системе генератора, либо должно регистрироваться собственное радиоизлучение земли или атмосферы (пассивные системы). А в некоторых случаях для исключения влияния облачности, в особенности при катастрофических наводнениях, может быть целесообразным дополнительно к спутникам использовать низко летающие самолеты и вертолеты. Вообще отметим весьма большую перспективность использования этих самолетов также и для отработки методики прогнозов. Следует также отметить, что фактические разрешения будут зависеть от деталей яркости элементов ландшафта и передаточной функции атмосферы. Для ярких элементов ландшафта и, что особенно важно для гидрологии, линейных объектов (реки, озера) они могут быть существенно выше.

Как отмечают Б.В. Виноградов и А.А. Григорьев [7], на снимках, сделанных длиннофокусным аппаратом с «Джемми-4» (М 1:700 000), детально проявилась вся овражно-балочная сеть, изображенная на карте штата Нью-Мексико (М 1:200 000). В Аравийской пустыне дендровидная эрозионная сеть тонкими светлыми нитями хорошо выделялась на снимках с этого спутника.

² Вряд ли можно в ближайшее время получить снимки сквозь лесной покров. Однако в большинстве районов, покрытых лесом, имеются и участки, свободные от леса. Вероятно, сток с них может быть индикатором стока и с окружающих лесных территорий. Это позволило бы наметить на основе экспериментальных работ наиболее простое решение – установление переходных функций от этих индикаторов к стоку с окружающих их лесных территорий.

В табл. 1 дается диапазон характерных значений гидрологических характеристик, нуждающихся в дистанционном измерении для использования предлагаемых способов прогноза в соответствии с физико-географическими особенностями бассейна и способа прогноза.

Для принятия оптимального решения (конечно, в случаях, когда речь не идет о человеческих жизнях) мы должны руководствоваться условием, что разность между экономией в результате предсказания (\mathcal{E}) и затратами (\mathcal{Z}) на проведение измерений и составление прогнозов будет максимальной $\psi(\Delta)=\text{макс}$. Для этой цели необходимо построить зависимость между возможной экономией (\mathcal{E}) и погрешностью прогноза Δ , а также степенью общих затрат, связанных с построением прогноза и его погрешностью.

Решая равенство $\mathcal{E}(\Delta)-\mathcal{Z}(\Delta)=\psi(\Delta)$, определяем $\psi(\Delta)=\text{макс}$. Весьма важным при таком подходе будет определение оптимального соотношения между наземными, самолетными и спутниковыми измерениями, а также выявление рациональных пропорций между маршрутными, выборочными и сплошными фотоизображениями земной поверхности.

Применение дистанционного зондирования для прогнозов стока в США

В США в настоящее время ведутся работы [35, 37] по созданию вычислительной системы для воспроизведения гидрографов стока с неизученных в гидрологическом отношении водосборов, привлекая, кроме обычных данных, также результаты дистанционных измерений, в частности измерения со спутников.

В основе этого проекта лежит предположение, что между параметрами модели, описывающей формирование дождевого стока, и физико-географическими характеристиками водосбора, определяемыми с помощью дистанционных измерений, может быть установлена тесная связь.

Проект состоит из трех частей.

- Разработка и испытания на основании наблюдений в хорошо изученном районе математических моделей стока, параметры которых находятся по данным дистанционных измерений, например, аэрофотосъемки, и некоторым вспомогательным наземным наблюдениям, например, данным о влажности почв. В

качестве такого опорного района была выбрана долина р. Теннеси, где имеется густая сеть гидрометеорологических станций.

- Проведение работ для какого-либо другого бассейна с густой сетью гидрометеорологических станций и заметно отличающегося от долины р. Теннеси физико-географическими и климатическими условиями.
- Испытание разработанной модели при отсутствии наблюдений за стоком для водосборов, расположенных в различных частях земного шара.

Работу по первой части проекта предполагалось завершить в 1973 г.

В основу исследований была положена известная Стэнфордская модель, позволяющая воспроизводить элементарные процессы стокообразования (инфильтрацию, поверхностное задержание, трансформацию гидрографа стока и др.) и рассчитывать гидрограф стока на основании наблюдений за осадками и испарением. Параметры модели (их 13) находятся с помощью методов оптимизации по наблюдениям за гидрометеорологическими факторами и измерениями стока в замыкающем створе водосбора. Всего предполагается в долине Теннеси учесть 35 водосборов. Наблюдения по 25 водосборам будут использованы для определения параметров и построения корреляционных зависимостей этих параметров с физико-географическими и топографическими характеристиками водосборов. Наблюдения по 10 водосборам будут служить материалом для проверки этих зависимостей.

По разработанным моделям для отдельных водосборов была проведена интересная в теоретическом и практическом отношении работа – оценена чувствительность рассчитанных гидрографов к ошибкам в задании параметров. Эти оценки позволили установить приведенные в табл. 2 предварительные требования к точности измерения исходных величин.

Отдельную задачу составляет проблема идентификации характеристик водосбора по аэро- и космическим снимкам. Здесь предполагается использовать панхроматические, цветные, инфракрасные, многоспектральные и другие снимки, почвенные, топографические и геологические карты, географические описания. Предполагается, что в результате выполнения проекта окажется

Таблица 2

Исследуемые характеристики	Требуемое разрешение (м)	Тип наблюдений
Топография бассейна	30	Высотные самолеты
Речная сеть	15	То же
Типы и распределения растительного покрова	90	Спутники с низкими орбитами
Типы почв	30	Высотные самолеты
Инфильтрационные параметры	—	Наземные наблюдения
Топография и свойства речных долин	3	Наземные наблюдения или низко летающие самолеты
Осадки	—	Наземные наблюдения
Испарение	—	То же

возможным производить непрерывные дистанционные наблюдения за водосбором и на основе этих наблюдений с помощью ЭВМ производить обработку данных дистанционных наземных наблюдений и давать прогнозы дождевых паводков.

Высоко оценивая технологическую сторону проекта, можно, однако, на основании большого опыта гидрологических исследований предвидеть, что точность прогнозов по этому проекту не будет высокой, так как корреляционные зависимости при таких коротких рядах (25–35 водосборов) и столь большом числе параметров не могут быть надежными. Отметим, что здесь можно ожидать лучших результатов от уже накопленных в гидрологии эмпирических связей, основывающихся на несравненно большем материале наблюдений.

Рассматриваемый проект не содержит принципиальных возможностей улучшения качества прогнозов на изученных бассейнах, так как основная задача (потери стока) решается традиционным способом. При дополнении этих работ новыми теоретическими построениями и использовании новой информации для разработки более точных способов учета потерь стока, определения притока воды и объема русловых запасов в дальнейшем можно было бы создать предпосылки для значительного улучшения качества прогнозов.

Изучение снежного покрова и прогноз весеннего половодья дистанционными методами³

В настоящее время наряду с наземными наблюдениями эффективно используются данные аэрофотосъемки и телевизионных изображений со спутников для определения характеристик снежного покрова: высоты снеговой линии в горах [30] и площади покрытости бассейнов снегом [30, 35, 38, 39, 40].

Начинают публиковаться первые руководства по применению спутниковых снимков для картирования снежного покрова [38].

Высота снеговой линии непосредственно входит в некоторые прогностические зависимости, и поэтому дистанционное ее определение может оказаться весьма полезным для усовершенствования прогнозов стока горных рек.

Что же касается площади покрытия поверхности бассейна снегом, то эти данные и особенно данные аэрофотосъемки могут быть использованы и для расчетов гидрографа талого стока. Действительно,

$$Q_t = \int_0^{t=\tau_{\max}} \eta F_{t-\tau} i_{t-\tau} p(\tau) d\tau, \quad (42)$$

где i – интенсивность водоотдачи снежного покрова; F – площадь бассейна, покрытая снегом; $p(\tau)$ – кривая добегаания; η – коэффициент стока, зависящий от влажности почвы (w), глубины промерзания (H), слоя растаявшего снега (x_t)

$$x_t = \int_0^t i dt.$$

Коэффициент стока η может быть определен по эмпирическим данным

$$\eta = f(x_t, \omega, H).$$

Входящую в формулу интенсивность водоотдачи можно рассчитать по наземным наблюдениям методом теплового баланса или более приближенно по температуре воздуха.

³ Чтобы избежать излишней дискуссионности, формирование весеннего стока рассматривается с традиционных позиций – анализа влияния снеготаяния на талый сток. При рассмотрении непосредственной причины скопления талых вод на поверхности бассейна мы в другой, непривычной плоскости измерений встретились бы с рядом неизученных процессов. Здесь и формирование первичной ручейковой сети, бесчисленные скопления воды перед снежными заносами, прорывы снежных «дамб» и др. Для создания новой теории нужно еще много теоретико-экспериментальных работ.

Влажность почвы w может быть определена по дистанционным измерениям в период времени, предшествовавший дате установления снежного покрова.

Глубину промерзания можно получить по данным агрометеорологических наблюдений. Таким образом, представляется возможным составлять прогноз половодья, опирающийся на сочетание дистанционных и наземных наблюдений.

Вместе с тем не исключена возможность определения запасов воды в снежном покрове, опираясь только на данные о площадях покрытия бассейна снегом и закономерности снеготаяния. При этом возможны два случая: первый – исследование картины схода снега на небольшой территории по детальным снимкам; второй – исследование, когда разрешающая детальность снимков не очень велика, и рассматриваются данные о площадях покрытия поверхности всего бассейна. Последний при этом все же не столь велик, чтобы различия в термическом режиме, определяющем снеготаяние, были бы существенными.

В первом случае можно получить следующие данные:

- изменение во времени в период снеготаяния доли площади бассейна, покрытой снегом $(F_{сн} / F_{общ})\% = f(t)$;
- изменение во времени суммарного слоя растаявшего снега (в переводе на воду), рассчитанного по наземным метеорологическим данным (для условий сплошного залегания хорошо известными в гидрологии методами);
- интегральные кривые распределения снегозапасов $H_i = f(\bar{H}, p)$, которые, по исследованию В.Д. Комарова, являются устойчивыми во времени и могут быть получены по материалам предыдущих наблюдений (рис. 10). Здесь p – вероятность превышения заданной величины стаявших снегозапасов (H_i).

В свою очередь меняющееся в период снеготаяния соотношение $F_{сн} / F_{общ}$ равно p :

$$p = F_{сн} / F_{общ}$$

Горизонтальные линии на рис. 10 соответствуют рассчитанным по наземным данным слоям стаявшего снега H_i . Зная H_i , полученное по наземным данным, и $F_{сн} / F_{общ}$, полученное путем дистанционного измерения, нетрудно по рис. 10 рассчитать и средний запас воды в снежном покрове:

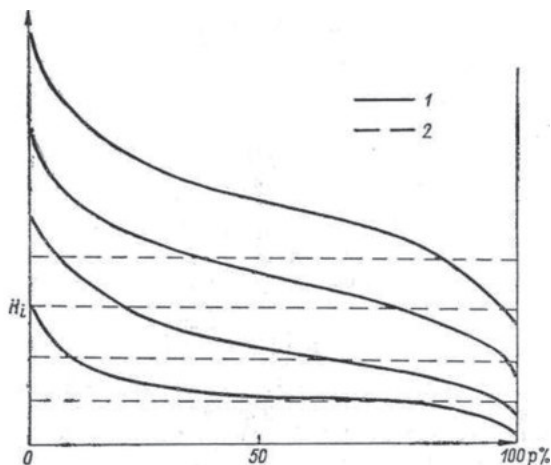


Рис. 10. Интегральные кривые распределения снегозапасов (H) по площади бассейна, выраженной в % ($p\%$) 1 – интегральные кривые снегозапасов; 2 – слой стаявшего снега

$$\bar{H} = \varphi \left(H_i, \frac{F_{сн}}{F_{общ}} \% \right). \quad (43)$$

Таким образом, на разные моменты времени мы можем определить запасы воды в снежном покрове указанным способом, что дает возможность непрерывно контролировать вычисления. Подтверждением возможности такого подхода к оценке снегозапасов являются исследования В.Д. Комарова [14], который показал, что полученные расчётным способом (по величине снеготаяния и интегральным кривым распределения снегозапасов) значения $F_{сн}/F_{общ}$ почти полностью совпадают с определенными по данным наземных наблюдений.

Возможность решения подобной задачи для вышеупомянутого второго случая менее ясна. Действительно, для этого случая в связи с меньшей детальностью мы должны уже рассматривать интегральные распределения средних величин снегозапасов по различным территориям. Поэтому необходимо выяснить влияние размеров территорий на форму и устойчивость этих кривых распределения и только после этого можно будет применить в значительной мере аналогичный описанному выше способ расчета.

Весьма интересной является также возможность оценки снегозапасов по естественному гамма-излучению. Действительно, почвы и

горные породы содержат естественные радиоактивные элементы, излучающие гамма-кванты (некоторые элементы урана, тория, радиоактивный изотоп калия, калий-40). Гамма поле до высоты в несколько сот метров обусловлено этим источником гамма-излучения. Проходя через снежный покров, интенсивное гамма-излучение ослабевает по экспоненциальному закону в зависимости от запасов воды в снежном покрове.

Этот способ измерения запасов воды в снежном покрове разработанный советскими учеными [24, 27, 22], получил затем применение и некоторое развитие в трудах зарубежных ученых [41].

Опираясь на данные самолетной гамма-съемки, с высот 25–100 м, оказалось возможным с точностью, близкой к точности наземных данных, получить поле, характеризующее распределение запасов воды в снежном покрове [27, 22].

По известным значениям запасов воды в снежном покрове x , определенный этим дистанционным способом, можно составить долгосрочный прогноз весеннего половодья. Действительно, общий слой весеннего стока у приближенно выражается уравнениями:

$$y = x - p_0 \left(1 - e^{-\frac{x}{p_0}} \right), \quad (44)$$

или

$$y = x - p_0 \operatorname{th} \frac{x}{p_0}. \quad (45)$$

Физический смысл параметра p_0 заключается в том, что он равен максимально возможному бассейновому водопоглощению. Для районов с глубоким промерзанием почв этот параметр зависит, только от влажности почвы.

Характеристики влажности почвы можно определить по спутниковым или самолетным съемкам. Расчетная зависимость составляется по материалам предшествующих наблюдений.

Так как в течение зимы влажность почвы обычно мало меняется, то эта величина или индекс, ее характеризующий, принимается равный влажности почвы, наблюдавшейся в период, непосредственно предшествующий дате установления устойчивого снежного покрова. При незначительной глубине промерзания, что часто наблюдается в районах с неустойчивой зимой, вводятся поправки на слабую промерзаемость почв. Интересно отметить, что, как показали

исследования В.Д. Комарова [14], для довольно обширных районов можно построить территориально общие зависимости, некоторые позволяют составить прогноз объема стока и для рек, по которым имеется наблюдений.

Что же касается прогноза максимальных расходов воды в период половодья, то, как и обычно, он должен опираться на прогноз общего объема весеннего стока.

Этот метод оказался весьма перспективным и при расчетах запасов воды на поверхности бассейна и в верхнем слое почвы [23, 24, 32]. Поскольку, скопления воды на поверхности бассейна и влажность приповерхностного слоя почвы до глубины порядка 30 см также оказывают влияние на снижение, гамма-излучения, по изменению интенсивности излучения представляется возможным судить и о величине влагозапасов в верхнем слое бассейна, имеющем решающее значение для формирования поверхностного и подземного стока.

Целесообразно организовать одновременно с существующим комплексом гидрологических наблюдений систематические стационарные наблюдения за естественным гамма-полем. Это может открыть новые возможности для изучения и прогноза гидрологических процессов.

Некоторые дальнейшие задачи исследований процессов формирования стока по аэрокосмическим снимкам

Одна из современных задач гидрологии – использование поступающей со спутников информации о поверхности Земли для анализа гидрологических процессов.

Основными направлениями в решении этой важной задачи являются:

- развитие теоретической концепции, позволяющей анализировать процессы формирования стока новыми методами;
- проведение комплекса наземных и высотных наблюдений за процессом формирования стока как в целях совершенствования теории, так и для установления параметров расчетных моделей;
- установление требований, позволяющих создать оптимальную с экономической и гидрологической точек зрения систему наземных и высотных наблюдений.

Представляется, что уже назрела необходимость создания на интересных в гидрологическом отношении полигонах, используемых для космических исследований, специальных гидрологических станций со значительной программой экспериментальных исследований. Такая станция должна включать:

- бассейны сравнительно небольших рек с детальным освещением топографии поверхности и русловой сети и систему наблюдений, позволяющих фиксировать уровни и расходы воды, термiku водоемов и динамику площадей русловой сети;
- стоквые станции, расположенные в различных физико-географических условиях. При этом некоторые из них должны иметь установки для орошения. Кроме обычных исследований, должна быть предусмотрена возможность произвольного фотографирования поверхности с постоянных вышек, привязанных аэростатов и стационарного измерения гамма-излучения. Эти площадки должны быть обеспечены детальной топографической основой, а также эпизодическими съемками запасов воды при различных величинах стока.

Эти наземные наблюдения, кроме специальных задач, могут, оказаться необходимыми для эталонного дешифрирования дистанционных наблюдений, проводящихся на полигонах со спутников и самолетов.

Кроме стыковки с космическими и самолетными экспериментальными исследованиями, на упомянутых станциях должно проводиться изучение структуры стока, необходимое для развития теории его формирования и разработки расчетных прогностических моделей.

Ряд сформулированных выше задач гидрологического прогнозирования может быть решен только по снимкам с высоким разрешением, что неизбежно повлекло бы большой поток информации. Поэтому следует предусмотреть решение этих задач на основе эталонных методических разработок для типичных однородных подстилающих поверхностей на выборочных тестовых участках с привлечением изображений как низкого, так и высокого разрешения. При этом космические снимки с низким разрешением должны быть использованы для выявления однородных физико-географических участков, на которые будут распространены получаемые на выборочных эталонных участках дешифровочные признаки.

Оптимальная система тестовых опорных участков для аэрофото-съемок и космических съемок с высоким разрешением, так же как и определение дифференцированных для разных гидрологических задач требований к разрешающей способности аппаратуры, будет определяться результатами комплексного подспутникового эксперимента.

В связи с решением ряда гидрологических задач дистанционными методами, включая фундаментальные задачи прогнозирования стока, необходимо совершенствование аппаратуры дистанционного зондирования, с одной стороны, в направлении совершенствования ее разрешающей способности, а с другой стороны – в направлении применения новых методов съемки в диапазонах, отличных от видимого. Последнее направление диктуется в первую очередь тем, что важная гидрологическая характеристика – водозапасы (будь то водозапасы замкнутого водоема, русловых систем, почвы, снежного покрова или атмосферы), необходимые как для воднобалансовых оценок, так и для прогноза стока рек, не определяются непосредственно снимками, полученными в видимом диапазоне.

В этом плане привлечение для оценки водозапасов указанных гидрологических объектов измерения собственного теплового излучения в сантиметровом диапазоне методами пассивной и активной радиолокации сулит существенный прогресс в гидрологии за счет получения новой количественной информации.

Создание соответствующей аппаратуры и разработка методик количественной оценки по излучению в сантиметровом диапазоне спектра водозапасов снежного покрова, атмосферы, почв и замкнутых водоемов является сейчас весьма актуальной и неотложной задачей, решение которой откроет широкие возможности для применения дистанционных методов в гидрологии.

Измерения в сантиметровом диапазоне, кроме того, даже при существующих низких разрешениях могут оказать большую помощь при интерпретации снимков в видимом диапазоне как дополнительная информация, не подверженная влиянию облачности.

Задачи изучения состояния водоемов, оценки степени их загрязнения и биологической продуктивности, а также характер изменения ряда гидрологических процессов, например характера снеготаяния, могут быть решены с использованием многозональной съем-

ки на основе закономерностей спектрального альбедо водных и снежных поверхностей в различном состоянии.

Не менее важной технической задачей может явиться развитие методов автоматизированной обработки изображений на ЭВМ и аналоговыми методами с целью опознания, выделения, генерализации и классификации гидрологических объектов и явлений, а также для автоматизированного получения численных параметров, столь важных для гидрологических прогнозов. Применение методов автоматизированной обработки изображений к гидрологии является особенно важным, поскольку водные ресурсы из всех видов природных ресурсов являются наиболее изменчивым элементом.

Рассмотренные ранее модели прогноза гидрологических характеристик весьма схематичные и нуждаются в совершенствовании. Однако представляется, что они могут быть полезными по следующим причинам:

- Эти модели включают новые факторы, не рассматривавшиеся в предыдущих моделях стока.
- Включающиеся в рассмотрение факторы (площади покрытия бассейна водой, площади русел и др.) непосредственно связаны с характеристиками стока и позволяют вести расчет, минуя такие трудно поддающиеся оценке элементы, как потери стока и частично осадки. Поэтому эти методы содержат в себе принципиальную возможность более точного прогнозирования, чем обычно применяющиеся способы прогнозов стока, основанные на учете осадков и потерь стока.
- Изложенные выше подходы к прогнозу стока стимулируют развитие новых экспериментальных и теоретических исследований, непосредственно связывающих структуру строения поверхности бассейна со структурой стока.

Рассматриваемые в настоящей статье гидрологические предпосылки прогнозов стока по снимкам земной поверхности указывают на новые возможности в этой области знания, появившиеся благодаря развитию дистанционных методов исследования природных ресурсов. Некоторые из этих возможностей могут быть реализованы в сравнительно короткое время. Однако полноценное использование новых возможностей требует проведения деталь-

ного анализа точности определения гидрологических характеристик по фотоснимкам, сделанным в различных зонах спектра, в различных масштабах и при различных погодных условиях с последующей оценкой влияния этих факторов на точность прогнозов стока.

Такой анализ должен будет служить основой для установления требований к точности дешифрирования снимков, точности установления переходных функций атмосферы и разработке новых методов изучения земной поверхности применительно к рассматриваемым задачам.

В заключение необходимо подчеркнуть, что разнообразие процессов формирования стока, четкая последовательность их развития во времени при различных по своим масштабам явлениях создает предпосылки для разработки системы способов прогнозов стока, опирающихся на разномасштабные во времени, и пространстве явления, происходящие на поверхности Земли. Это создает благоприятные условия для последовательного (по мере развития точности дешифрирования) применения дистанционных методов измерения в целях изучения процесса формирования режима вод суши и прогнозов стока.

Итак, в настоящее время, конечно, при развитии обширных исследований, появляется принципиальная возможность создания новой системы составления прогнозов почти всех видов стока и частично методов расчета стока на основе дистанционного зондирования. Представляется, что эта новая система прогнозирования стока будет постепенно дополнять, а в некоторых случаях, где она окажется более точной и экономически более выгодной, чем существующая, и заменять последнюю.

Основное значение этой работы в том, что из нее следует четкая программа будущих исследований как в целях дальнейшего познания процесса формирования стока, так и в развитии методов расчета стока, основанных не только на наземных, но и на дистанционных методах измерения.

Рассмотренные здесь вопросы могут быть полезными и в других, отраслях быстро развивающейся науки – аэрокосмических методах землеведения, значительная роль в формировании которой принадлежит К.Я. Кондратьеву [8, 10, 15]. Важная работа в этом направле-

нии проводится также на географическом факультете МГУ под руководством К.А. Салищева [25].

Автор считает своей обязанностью выразить глубокую благодарность коллективам отдела регионального и глобального водообмена ИВП АН СССР и географического факультета МГУ за оказанную помощь в создании этой работы.

Резюме

Сделана попытка создания новой принципиально более точной системы составления прогнозов по аэро- и космическим съемкам гидрологических явлений, особенно наводнений. Показано, что площадь затопления поверхности водосбора является весьма точным индикатором поверхностного стока и подземного питания рек, на основании чего предложены методы определения переходных функций от фотоизображений затопленной поверхности водосбора к расчетам (прогнозам) стока. Предлагаются способы определения переходных функций от площади затопления притоков различных размеров к расчету (прогнозу) гидрографа и объема стока. Выясняются также возможности прогноза весеннего половодья по дистанционным наблюдениям за снежным покровом и влажностью почвы.

Ряд причин позволяет считать, что гидрология может стать одной из первых областей природоведения, где аэрокосмические методы исследования дадут наибольший теоретический и практический эффект. К таким причинам в первую очередь относятся:

- четкая последовательность формирования гидрологических явлений во времени при различной их продолжительности, а также в пространстве при различных их размерах (например, сток на поверхности бассейна→сток в овражно-балочной сети→сток в притоках первого порядка→сток в притоках второго порядка→...→сток в главной реке). Это позволяет, используя те или иные фазы стока и соответствующие данному времени технические возможности их фиксации, остановиться на оптимальных масштабах съемок и точности предвычислений;
- водотоки как линейный элемент ландшафта фиксируются съемками точнее, чем многие другие элементы земной поверхности;
- во многих из уже разработанных в гидрологии физико-математических моделях (например, стока) входящие в них гидрологи-

ческие факторы могут быть заменены небольшим числом факторов, фиксируемых аэро- и космическими съемками земной поверхности и прилегающих к ней слоев гидросферы. Это будет стимулировать постановку новых наблюдений и экспериментов, что даст новые материалы для развития теории, а также повышения точности прогноза и расчета и перевода их на качественно другой уровень;

- имеется возможность расчета и прогноза стока также для неизученных бассейнов при условии дополнительного построения обобщенных зависимостей для расчета кривых добегания и склонового стока q по покрытым водой площадям бассейна ω и уклонам i местности $q=f(\omega, i)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Л.Г. Новые формулы и номограммы для расчетов ливневой сети промпредприятий и населенных пунктов. М., Трансжелдориздат, 1949, 205 с.

2. Алексеев Г.А. Динамика инфильтрации воды в почву. – «Труды ГГИ», 1948, вып. 6(60), с. 43–72.

3. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Гидрологические прогнозы. Л., Гидрометеиздат, 1960, 407 с.

4. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Г. Определение геофизических параметров по измерениям теплового радиоизлучения на ИСЗ «Космос-243», – «ДАН СССР», 1969, т. 188, №6, с. 1273–1276.

5. Башаринов А.Е., Гурвич А.С. Исследование поля радиотеплового излучения Земли. – «Изв. АН СССР», сер. физика атмосферы и океана, т. 6, №4, с. 366–380.

6. Виноградов Б.В. Определение влажности почвы дистанционными аэрокосмическими методами. – «Водные ресурсы», 1973, №3, с. 70–92.

7. Виноградов Б.В., Григорьев А.А. Использование космических фотографий для изучения экзогенных форм рельефа. – «Изв. ВГО», 1970, Т. 102, №6, с. 512–520.

8. Виноградов Б.В., Кондратьев К.Я. Космические методы земледования. Л., Гидрометеиздат, 1971, 188 с.

9. Дистанционная индикация влагозапасов атмосферы и подстилающей поверхности. – «Водные ресурсы», 1973, №2, с. 58–68.

Авторы: Кондратьев К.Я., Мелентьев В.В., Рабинович Ю.И., Шульгина Е. М.

10. Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций. Под редакцией К.Я. Кондратьева. Л., Гидрометеиздат, 1972, 399 с.

11. Калинин Г.П. К методике прогноза объема стока больших рек. – «Труды ЦИП», 1947, вып. 4, с. 3–25.

12. Калинин Г.П. Основы методики краткосрочных прогнозов водного режима. – «Труды ЦИП», 1952, вып. 28, 166 с.

13. Калинин Г.П. Схема расчета склонового стока. – В кн.: Проблемы речного стока. М, МГУ, 1968, с. 143–148.

14. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР, условия его формирования и методы прогноза. Л., Гидрометеиздат, 1959, 295 с.

15. Кондратьев К.Я. Космическая экология. – «Метеорология и гидрология», 1972, №5, с. 108–113.

16. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М. О возможности определения характеристик поверхностного слоя почвы по его тепловому радиоизлучению. – «ДАН СССР», 1970, Т. 194, №6, с. 1313–1315.

17. Кондратьев К.Я., Шульгина Е.М. Определение некоторых характеристик почвы по данным ее микроволнового излучения. – «ДАН СССР», 1971, Т. 200, №1, с. 88–90.

18. Куделин Б.И. Гидрогеологический анализ и методы определения подземного питания рек. – «Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Саваренского», 1949, Т. V, 180 с.

19. Курдюмов Л.Д. Строение естественных водных систем. – «Изв. АН СССР», отд. тех. наук, 1951, вып. 6, с. 887–899.

20. Марков К.К. Основные проблемы геоморфологии. М., Географгиз, 1948, 344 с.

21. Нежиховский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л., Гидрометеиздат, 1971, 475 с.

22. Коган Р.М., Никифоров М.В., Фридман Ш.Д., Чирков В.П., Яковлев А.Ф. Определение влагозапасов в снежном покрове методом самолетной гаммасъемки. – «Метеорология и гидрология», 1965, №4, с. 51–55.

23. Дмитриев А.В., Коган Р.М., Никифоров М.В., Фридман Ш.Д. Определение влажности почв по их гамма-излучению. – «Метеорология и гидрология», 1965, №7, с. 56–58.

24. Дмитриев А.В., Коган Р.М., Никифоров М.В., Фридман Ш.Д. Определение водных запасов в верхнем слое почв и на ее поверхности методом гамма-съемки. – «Труды ИЭМ», 1971, вып. 7, с. 183–191.

25. Салищев К.А., Вышивкин Д.Д., Копыл И.В. и др. Результаты комплексного географического дешифрирования снимков с орбитальной станции «Салют» и проблемы тематического картографирования. – «Вестник МГУ», сер. география, 1974, №1, с. 18–23.

26. Ржаницын Н.А. Морфометрические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л., Гидрометеиздат, 1960, 238 с.

27. Дмитриев А.В., Коган Р.М., Никифоров М.В., Фридман Ш.Д. Самолетная гамма-съемка снежного покрова. – «Метеорология и гидрология», 1970, №3, с. 83–94.

28. Сапожников В.И. Основы прогноза стока по запасам воды в речной сети. Л., Гидрометеиздат, 1956, 104 с.

29. Генин Г.Б., Абросимов И.К., Богородский С.М., Востокова Е.А. Современные технические средства изучения Земли из космоса и зарубежный опыт их использования в геологии. Серия: общая и региональная геология; геологическое картирование. М., Изд. ВИЭМС, 1972, 71 с.

30. Темников С.Н. Использование телеинформации метеорологических спутников Земли в гидрологических целях. – «Метеорология и гидрология», 1970, №3, с. 58–64.

31. Темников С.Н. Некоторые вопросы использования спутниковой информации для изучения снежного покрова. – «Труды САРНИГМИ», 1972, вып. 65/80, с. 138–149.

32. Фридман Ш.Д., Дмитриев А.В., Коган Р.М. Самолетная гамма-съемка запасов влаги в слое поверхностного задержания. – «Метеорология и гидрология», 1973, №4, с. 64–76.

33. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М., Изд-во иностр. лит., 1948, 159 с.

34. Чайлдс Э. Физические основы гидрологии почв. Л., Гидрометеиздат, 1973, 427 с.

35. AdeIman A., Ambaruch R., Simmons J.W. Developments in applications of remote sensing to Hydrology. XXIII International Astronautical Congress, Applications satellites, session 1, 1972, October, Vienna, p. 1–50.

36. Earth resources evaluation Study (Series H-1). Progress report September 16 – November 12, 1971. IBM, No. 71W-00375, prepared for NASA under Contract NAS8-1400/SA 1883. Technical Directive DS-IU-25-71. Dec., 1971.

37. Application of remote sensing to hydrology. Technical progress report July 1 – December 31, 1972. IBM, No. 37W-00089, prepared for NASA under Contract; NAS8-1400/SA2171. Technical Directive DS-14-25-72 MSFC DRL 008-A, Line Item 161. March, 1973.

38. Barnes J.C., Bowley C.J. Operational guide for mapping snow cover from satellite photography. Final report. Contract No. E-162-67 (N). Allied research associates «Concord Mass». 1968, p. 1–116.

39. Barnes J.G., Bowley C.J. Satellite surveillance of mountain snow in the Western United States. Final report. Contract No. E-196-68. Allied research associates «Concord Mass», 1969, p. 1–78.

40. Barnes J.C., Bowley C.J. Snow cover distribution as mapped from satellite photography. – «Water Resource Research», 1968, v. 4, No. 2.

41. Peck E.L. Review of methods of measuring snow cover, snowmelt and streamflow under winter conditions. International Symposium on the role of snow and ice in Hydrology. Symposium on measurements and forecasting. Session; WMO-1. Measurement in space and time, 1972, p. 1–18.

42. Poe G., Stogryn A., Edgerton A.T. Determination of soil moisture content using microwave radiometry. Summary report 1684 IR-2, Contract No. 0-35239, Aerojet-General Corp., EL Monte, Calif., June, 1971.

Ковалевский Владимир Серафимович

(31.8.1931 – 16.7.2006)



Ковалевский В.С. – крупный учёный-гидрогеолог, доктор геолого-минералогических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, «Заслуженный деятель науки России».

В 1954 г. он окончил геологический факультет МГУ. В 1959 г. защитил кандидатскую диссертацию «Гидрогеологические условия среднего Прикамья и направления их изменений после создания Нижне-Камского водохранилища», в 1974 г. докторскую диссертацию «Условия формирования и прогнозы

естественного режима подземных вод».

В ИВП РАН работал с 1969 г. сначала в должности заведующего лабораторией прогнозов режима подземных вод, с 1993 г. – главный научный сотрудник лаборатории региональных гидрогеологических проблем.

В.С. Ковалевский – известный в стране и за рубежом специалист в области режима и ресурсов подземных вод, в течение 10 лет он возглавлял Гидрогеологическую секцию Национального комитета геологов СССР, в течение 8 лет избирался вице-президентом Международной ассоциации гидрогеологов, в течение 4 лет был вице-президентом комиссии подземных вод Международной ассоциации гидрологических наук, в течение ряда лет возглавлял комиссию «Режим и баланс подземных вод» Научного совета РАН по гидрогеологии и инженерной геологии.

В.С. Ковалевский был удостоен премий РАН им. Ф.П. Саваренского и МОИП, активно сотрудничал с ЮНЕСКО, являясь соавтором и соредактором двух международных монографий по гидрогеологическим исследованиям, изданных в 1974 и 2004 гг. Вёл научно-

педагогическую работу и подготовил 6 кандидатов наук. Член научных советов ИВП и Института геоэкологии РАН, эксперт ГКЗ. Более 20 лет Владимир Серафимович был членом редколлегии журнала «Водные ресурсы», а также многие годы представлял отечественную науку в редколлегии международного журнала «Environmental Geology».

В своей научной деятельности занимался вопросами изучения закономерностей формирования режима и ресурсов подземных вод в естественных и нарушенных условиях; разработкой методов прогноза режима и ресурсов подземных вод, исследованиями и прогнозами влияния изменения гидрогеологических условий на окружающую среду, разработкой методологии эколого-гидрогеологических оценок и картирования состояния территорий, методами прогнозов и оценками воздействий изменений климата на режим и ресурсы подземных вод, проблемами комбинированного использования ресурсов поверхностных и подземных вод в целях повышения эффективности использования водных ресурсов. Результаты проведенных исследований отражены в более 180 публикациях, включая 8 персональных и 6 коллективных монографий.

Его ученики и последователи – сотрудники ИВП РАН В.Л. Злобина, Ю.А. Медовар, Н.Г. Максимова.

М.И. Степанова

О взаимосвязанности уровней подземных вод соседних лет¹

В.С. Ковалевский

Изучение степени взаимосвязанности уровней подземных вод соседних лет имеет различные практические аспекты и проводится в связи с оценкой интенсивности водообмена водоносных горизонтов при изучении условий формирования подземных вод или для обоснования возможностей составления прогнозов режима подземных вод с заблаговременностью до одного и более лет.

Малые скорости фильтрации подземных вод предопределяют накапливание в водоносных горизонтах инфильтровавшихся атмосферных осадков нередко за несколько предыдущих лет. Наблюдаемые уровни подземных вод, таким образом, отражают интегральную характеристику метеорологической обстановки (соотношений осадков и испарения) какого-то предшествовавшего периода, величина которого зависит от фильтрационных свойств водовмещающих пород, степени расчлененности рельефа и других факторов.

Регулирующая роль водовмещающей среды, рассредоточивающей разгрузку подземных вод во времени, определяет повышенную по сравнению с другими частями гидросферы инерционность и взаимосвязанность уровней и дебитов подземных вод смежных лет. Так, по данным Е. Евджевича (США), связи между осадками смежных лет нет, а между поверхностным стоком из 140 рядов по рекам США составляет в среднем 0,18. По данным М.Ф. Менкеля и С.Ф. Крицкого, взаимосвязанность годового стока рек СССР составляет в среднем $R_t=1=0,25$, где $R_t=1$ – коэффициент автокорреляции со сдвигом в 1 год (Понятие об автокорреляционных функциях и коэффициентах автокорреляции подробно рассмотрено в работах К. Брукс и Н. Карузерс(1963), Е.С. Вентцель(1969), С.М. Семенова(1969), В.С. Ковалевского(1972) и др.).

Проведенный нами автокорреляционный анализ массового материала по наиболее длинным рядам наблюдений за естественным режимом подземных вод СССР и США показал, что средний коэффициент автокорреляции для уровней грунтовых вод состав-

¹ Ковалевский В.С. О взаимосвязанности уровней подземных вод соседних лет. В сб. Изучение и картирование ресурсов подземных вод, М.: Наука, 1974г., 176 с. Отв. редактор В.С. Ковалевский (стр. 134–138)

лет 0,52, а для напорных вод – 0,71, что свидетельствует о значительно большей зарегулированности подземных вод по сравнению с поверхностными.

Автокорреляция осуществлялась для выявления цикличности или периодической составляющей в режиме подземных вод, а также с целью установления взаимосвязанности уровней подземных вод соседних лет.

Расчет автокорреляционных функций проводился отдельно для среднегодовых, минимальных предвесенних и максимальных весенних уровней подземных вод.

Результаты расчетов можно проиллюстрировать следующей таблицей (расчеты были проведены по 192 скважинам СССР и по 79 скважинам США с продолжительностью периода наблюдений от 10 до 80 лет.).

Таблица 1

Количество случаев с различными коэффициентами автокорреляции для разных сдвигов, %

Анализируемый уровень	Сдвиг $\tau=1$ год			Сдвиг $\tau=2$ года			Сдвиг $\tau=3$ года		
	>0,8	0,6–0,8	0,4–0,6	>0,8	0,6–0,8	0,4–0,6	>0,8	0,6–0,8	0,4–0,6
Среднегодовой	24	29	21	6,5	20	18	6,5	10	9
Минимальный предвесенний	12	23	22	5,5	11	16	3	3	6,4
Максимальный весенний	15	19	24	7	14	11	4	11	10

Как видно по данным таблицы, высокая степень взаимосвязанности уровней подземных вод для соседних лет, разделенных интервалом времени τ , при заблаговременности в один год может быть достигнута по среднегодовым уровням с коэффициентом корреляции свыше 0,8 в 24% случаев, по минимальным предвесенним – в 12% и по максимальным весенним – в 15% случаев, т.е. для составления прогнозов в этих случаях могут быть использованы только парные корреляционные связи прогнозного среднегодового, минимального или максимального уровня от соответствующих уровней предыдущего года.

С увеличением заблаговременности до двух и трех лет возможность получения прогнозов высокой достоверности тем же методом постепенно затухает до 7–3%. Однако, если снизить требования к точ-

ности прогнозов и принять в качестве критерия тесноты связи $R_t=0.6$, то возможность составления прогнозов, удовлетворяющих этому требованию, резко возрастает. Так, для заблаговременности в один год качественные прогнозы среднегодовых уровней могут быть получены в 53% случаев, при заблаговременности в два года – в 26,5% и три года – в 16,5% случаев. Аналогичным образом могут быть получены прогнозы минимальных предвесенних и максимальных весенних уровней соответственно до двух-трех лет в 35, 16,5, 6% случаев и 34, 21, 15% случаев.

Зависимость последующих уровней от предыдущих, выражаемая коэффициентом автокорреляции, отражает усредненную связь каждого последующего уровня от предыдущего независимо от наличия цикличности в анализируемом многолетнем ряду. Вскрытие же аналогичных связей отдельно для периодов подъема и спада уровней в многолетнем разрезе показывает, что коэффициенты корреляции связей уровней соседних лет на ветви многолетнего спада всегда выше коэффициентов корреляции связей уровней соседних лет, располагающихся на ветви многолетнего подъема.

Последнее обстоятельство показывает, что при наличии достаточно длинных рядов наблюдений целесообразно составление двух или даже трех уравнений регрессии: для ветвей спада, подъема и суммарную, которой можно пользоваться в годы намечаемых перегибов в многолетних колебаниях уровней.

Анализ взаимосвязанности уровней и расходов подземных вод соседних лет показывает, что наиболее низкие коэффициенты автокорреляции наблюдаются в хорошо фильтрующих породах в районах с интенсивной дренированностью подземных вод, а наиболее высокие – в слабо фильтрующих породах и в слабо дренированных водоносных горизонтах с большой протяженностью пути фильтрации подземных вод.

Другими словами, взаимосвязанность уровней подземных вод соседних лет определяется степенью инерционности водоносного горизонта, регулирующей ролью водовмещающей среды, в которой формируются подземные воды, или степенью интенсивности водообмена водоносных горизонтов. При этом понятие полного водообмена водоносного горизонта, естественно, условно, так как даже в пределах грунтовых вод, особенно в случае неоднородного

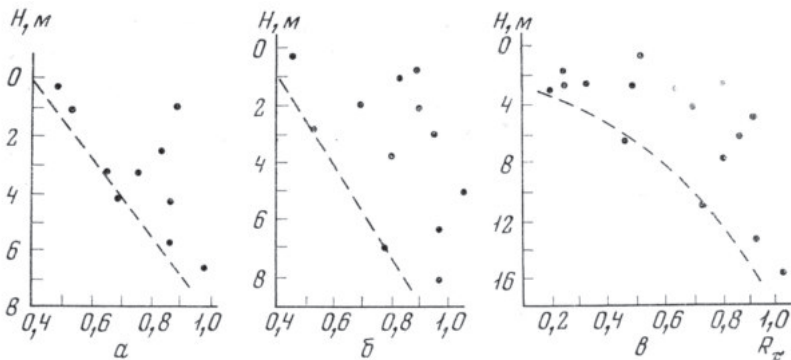


Рис. 1. Графики зависимости коэффициентов автокорреляции от глубины залегания грунтовых вод в супесях (а), суглинках (б) и песках (в)

строения водоносной толщи и большой ее мощности, отдельные прослои (верхние или нижние) могут обмениваться значительно быстрее остальных.

Анализ зависимости степени взаимосвязанности уровней соседних лет от глубины залегания подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах не вскрыл достаточно четких закономерностей. В водоносных же горизонтах, представленных супесями и суглинками (несколько хуже в песках), намечается определенная тенденция к увеличению коэффициентов автокорреляции с глубиной (рис. 1). Более того, автокорреляция наиболее длинных рядов наблюдений за режимом напорных вод (рассматривался в основном материал по США, где имеются сравнительно продолжительные (30–35 лет) наблюдения за естественным режимом напорных вод) показывает наличие довольно высокой взаимосвязанности уровней ряда соседних лет. Средний коэффициент автокорреляции для лет, разделенных интервалом времени в один год, составил, как уже указывалось, 0,71, а с интервалом времени в два года – 0,57, что позволяет почти во всех случаях составлять прогнозы режима напорных вод с заблаговременностью в два года, основываясь только на данных об уровнях последнего года. Затухание коэффициента автокорреляции с увеличением времени сдвига осуществляется чаще всего очень медленно, что свидетельствует о наличии длиннопериодной цикличности в режиме напорных вод.

Прогнозы режима подземных вод (минимальных, максимальных или среднегодовых значений уровней) с использованием установленной взаимосвязанности рядов осуществляются методом обычной парной корреляции, где, например, при прогнозе уровня или дебита подземных вод на один год, т.е. при $\tau=1$, в качестве y используется анализируемый ряд наблюдений без первого члена, в качестве x – тот же ряд без последнего члена, а в качестве коэффициента корреляции – коэффициент $R_{\tau}=1$. Точность таких прогнозов оценивается также обычными методами (Ковалевский, 1972).

ЛИТЕРАТУРА

1. Брукс К, Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. Л., Гидрометеиздат, 1963.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., «Наука», 1969.
3. Ковалевский В.С. Долгосрочные прогнозы естественного режима грунтовых вод. М., 1972.
4. Семенов С.М. О возможности составления сверхдолгосрочных прогнозов режима грунтовых вод на основе использования аппарата автокорреляционных функций. – В сб.: Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод. М., Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1969.

Коренистов Дмитрий Васильевич

(26.10.1910 – 3.4.1996)

Коренистов Дмитрий Васильевич – выдающийся инженер-гидротехник, известный специалист в области гидрологии, водного хозяйства и гидроэнергетики, лауреат Государственной премии СССР (в 1951 г. – Сталинская премия).

Д.В. Коренистов родился 26 октября 1910 г. в посёлке при станции Дивенская Варшавской железной дороги Ленинградской области. В 1928 г. окончил среднюю школу в г. Ленинграде. В связи с тяжёлым материальным положением семьи ему пришлось сразу после оконча-



ния школы начать трудовую деятельность с должности рабочего изыскательской партии в Управлении работ по исследованию и составлению проекта Камско-Печерского водного пути (Укампрек) Всесоюзного объединения речного транспорта Наркомата путей сообщения СССР. После окончания организованных при Укампреке технических курсов (1929–31 гг.) Д.В. Коренистов работает техником и вскоре старшим техником указанного Управления (позднее реорганизованного в Гипроводтранс). В 1931 г. Д.В. Коренистов поступил в Вечерний гидротехнический институт, где проучился всего 3 года в связи с ликвидацией института в 1933 г.

В 1933–35 гг. работал старшим техником-инспектором в отделе ирригации Ленинградской конторы Нижневолгопроекта. Осенью 1935 г. начал работать в отделе гидрологии Управления строительства канала Москва–Волга (позднее переименован в канал им. Москвы) в г. Дмитров, где проработал до завершения строительства; затем трудился в службе эксплуатации канала до 1941 г. В начале Великой Отечественной войны 1941–45 гг. Дмитрий Васильевич был

направлен в Особую гидротехническую экспедицию Главгидростроя (позднее Главоборонстроя) НКВД, участвовал в рекогносцировке и строительстве водных рубежей на Западном и Северо-Западном направлениях фронта; а также в экспедиции Управления оборонительных сооружений Народного комиссариата обороны (УОС НКО) в Ивановской области.

В 1942 г. Д.В. Коренистов был отозван из УОС НКО и переведён в Управление проектно-изыскательских работ Главпромстроя НКВД (позднее переименован в Гидропроект МВД, а затем в проектно-изыскательский и научно-исследовательский Институт «Гидропроект им. С.Я. Жука»). Там он проработал до 1969 г. – сначала в должности старшего инженера, а с 1951 г. – в должности заместителя начальника проектного отделения водного хозяйства. В этот период Д.В. Коренистов руководил разработкой водохозяйственных разделов проектов Волго-Донского судоходного канала, Цимлянского гидроузла на р. Дон, Куйбышевского, Волгоградского, Саратовского гидроузлов на р. Волге, каналов Северский Донец – Донбасс, Иртыш – Караганда, Асуанского гидроузла на р. Нил и других объектов. За участие в проектировании и строительстве Волго-Донского комплекса и Куйбышевского гидроузла Д.В. Коренистов награждён двумя орденами «Знак Почёта» в 1952 и 1958 гг., соответственно.

Эффективную проектную деятельность Д.В. Коренистов успешно сочетал с научными исследованиями в области гидрологии, водного хозяйства и гидроэнергетики; он стал одним из лучших специалистов в этой области; тесно сотрудничал с Секцией водохозяйственных проблем АН СССР; опубликовал более 40 научных работ. Следует особо отметить монографии, соавтором которых он являлся: «Гидрологические основы речной гидротехники» (1950 г.), «Волго-Дон», «Волжская Гидроэлектростанция им. В.И. Ленина» (1964 г.), «Колебания уровня Каспийского моря» (1975 г.).

В 1951 г. авторский коллектив (С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, К.И. Россинский, Я.Д. Гильденблат, В.Р. Казак, Д.В. Коренистов, И.А. Кузьмин) был удостоен Государственной премии СССР третьей степени (в 1951 г. – Сталинская премия в области технических наук) за упомянутый выше капитальный труд «Гидрологические основы речной гидротехники».

Д.В. Коренистов – один из идеологов создания Правил использования водных ресурсов водохранилищ и составитель первых Правил для водохранилищ на реках Волге и Дон. Он участвовал в работе Государственных комиссий по приёму в эксплуатацию крупнейших гидроузлов: Волжской ГЭС им. В.И. Ленина, Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС, Братской ГЭС.

В 1969 г. Д.В. Коренистов как высококвалифицированный специалист, обладающий большим опытом в области комплексного использования водных ресурсов и управления системами и каскадами водохранилищ, был приглашён (в порядке перевода из Гидропроекта) в Институт водных проблем АН СССР на должность заведующего сектором теории регулирования стока. Свой богатый опыт проектной и научно-исследовательской работы он использовал при решении важных научных задач, поставленных в те годы перед Институтом: прогнозирование рационального использования и охраны водных ресурсов страны на перспективу 1985, 1990, и 2000 годы; исследование водохозяйственных проблем бассейна Каспийского моря; обоснование методики оценки допустимых объёмов стока при его территориальном перераспределении; рационализация режима работы Волжско-Камского каскада гидроузлов и др.

В числе наиболее значимых работ Д.В. Коренистова, опубликованных (в соавторстве) за период его многолетней (около 20 лет) работы в Институте, можно выделить следующие: «Проблемы теории регулирования стока» (в соавторстве с С.Н. Крицким, М.Ф. Менкелем), в Сб.: «Проблемы изучения и использования водных ресурсов». М.: Наука. 1972; «Проблема Аральского моря» (в соавторстве с С.Н. Крицким, М.Ф. Менкелем), в журнале «Водные ресурсы». №1. 1972; Руководство по составлению водохозяйственных балансов (в соавторстве). Издание Объединённых Наций. Нью-Йорк. 1974; «О теоретических основах использования речного стока в СССР» (в соавторстве с С.Н. Крицким), в журнале «Водные ресурсы». №6. 1977 г; «О приращении уровней замкнутых водоёмов» (в соавторстве с С.Н. Крицким), в Сб.: «Проблемы изучения и комплексного использования водных ресурсов». М.: Наука. 1978; Подраздел «Водные ресурсы» (совместно с Вендровым С.Л., Каминским В.С., Минкиным Е.Л.). Том «Природные ресурсы СССР» М.: Знание, 1983.

Д.В. Коренистов принимал участие в работе экспертных комиссий Госплана СССР и Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике; являлся членом Научного Совета по проблеме «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» при указанном комитете; на протяжении многих лет был членом учёного и научно-технического советов института «Гидропроект им. С.Я. Жука».

Награждён медалями за заслуги в период Великой Отечественной войны: «За оборону Москвы» (1946 г.), «За победу над Германией» (1946 г.); юбилейными медалями «20 лет победы над Германией» (1965 г.) и «30 лет Победы в Великой Отечественной войне» (1975 г.); двумя орденами «Знак Почёта» за трудовые достижения; медалью «В память 800-летия Москвы» (1948 г.), медалью «Ветеран труда» (1974 г.).

Дмитрий Васильевич был неординарным, благожелательным, замечательным человеком; он отличался энциклопедическими знаниями, которыми охотно делился с коллегами; пользовался огромным уважением и авторитетом в коллективе Института.

Л.Ф. Сотникова (ИВП РАН)

Проблемы теории регулирования речного стока¹

Д.В. Коренистов и др.

В предлагаемой статье кратко освещается современное состояние теории регулирования речного стока и намечаются важнейшие направления дальнейших научных исследований, необходимость в которых возникает в связи с ростом и усложнением водного хозяйства страны.

Регулирование речного стока в ограниченных с современной точки зрения масштабах применялось в России в XVIII–XIX столетиях как основа промышленной энергетики (например, на уральских горных заводах). С распространением паровых машин водяные силовые установки утратили свое значение. В недавнем, прошлом народное хозяйство почти повсеместно и почти во всех отраслях удовлетворялось использованием водных ресурсов при естественном гидрологическом режиме водоисточников. Искусственное перераспределение речного стока по времени оказывалось необходимым лишь в районах, прилежащих к водоразделам речных систем (например, в Донбассе, на Урале), и велось в основном в интересах водоснабжения населения и промышленности. Первые построенные в стране более или менее крупные по тем временам гидроэлектростанции (Волховская, Земо-Авчальская, Кондопожская, Хариузовская и другие), равно как и оросительные системы, использовали сток в естественном состоянии. Перераспределение стока по территории было также весьма ограниченным и сводилось к строительству водопроводных линий от источника к району потребления, небольших по протяжению и пропускной способности (к крупнейшим из них принадлежал построенный в 1911–1917 гг. Баку–Шолларский водопровод длиной 186 км, рассчитанный на подачу до 0,9 м³/сек), а в традиционных областях орошаемого земледелия – также относительно небольших ирригационных каналов.

Начавшееся в конце 20-х годов широкое развитие гидротехнического строительства тотчас же поставило вопрос о регулировании речного стока как необходимом условии рационального использования водных ресурсов.

¹ Коренистов Д.В., Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Проблемы теории регулирования стока // в сб.: «Проблемы изучения и использования водных ресурсов». М.: Наука. 1972, стр. 50–83.

Потребовались объективные методы расчета регулирующих водохранилищ и определения целесообразной мощности (производительности) водохозяйственных установок при проектировании, методы управления работой водохозяйственных систем в процессе их эксплуатации.

Обращение к иностранному опыту показало, что и за рубежом теоретическая разработка проблем инженерной гидрологии и регулирования стока в то время лишь начиналась, и надежных приемов расчета, пригодных для непосредственного применения, еще не было. Вместе с тем знакомство с работами Хазена (Hazen, 1914), Фостера (Foster, 1924) и других иностранных исследователей, внесших в гидрологию представление о речном стоке как о вероятностном процессе, оказалось плодотворным. Вероятностный подход создал объективную основу для предвидения колебаний речного стока и соответственно для разработки теории его регулирования. Первыми в нашей стране исследованиями стока как вероятностного процесса были работы Д.Л. Соколовского (1930), Г.П. Иванова (1946). Впервые применили вероятностные методы к расчетам регулирования речного стока С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель (1932). В течение последующих десятилетий изучением вероятностных закономерностей речного стока и вопросами расчета регулирующих его водохранилищ занимались многие как советские, так и зарубежные исследователи.

К настоящему времени теория регулирования стока сложилась в самостоятельную научную дисциплину, разрабатывающую технологию использования водных ресурсов и обеспечивающую в этом аспекте целесообразность проектных решений в водохозяйственном строительстве. Это – развивающаяся дисциплина. Новые данные о закономерностях речного стока, все более сложные водохозяйственные задачи, выдвигаемые народным хозяйством, требуют постоянной, планомерной научно-исследовательской работы по всем разделам теории регулирования.

Гидрологические предпосылки теории регулирования стока

Речной сток как стохастический процесс

Условия работы водохозяйственной установки зависят от гидрологического режима используемого водотока. Чтобы предвидеть этот режим, нужно раскрыть закономерности, проявляющиеся в

колебаниях гидрологических явлений, в первую очередь речного стока. Режим колебаний компонентов водного баланса (атмосферные осадки, испарение и речной сток) есть сложный стохастический процесс. Сочетаются детерминированные изменения (главнейшее из них годовой цикл) с колебаниями, воспринимаемыми как случайные. Случайные вариации определяют в основном режим многолетних колебаний стока.

Стохастическая природа колебаний стока предопределяет вероятностную форму его предвидения. Оценивается частота появления лет и сезонов различной водности на протяжении многолетнего периода без привязки этих событий к определенным срокам. Такая форма предвидения распространяется на все водохозяйственные построения, связанные с использованием стока. Вероятностные представления ложатся в основу методики расчетов работы регулирующих сток водохранилищ, определения требуемых их размеров, величины отдачи, степени бесперебойности ее поддержания и методов эксплуатации водохозяйственных систем.

В современной практике процесс колебаний стока представляется как стационарный – распределение вероятностей естественного, не измененного человеческой деятельностью стока принимается неизменным на протяжении промежутка времени, охватывающего прошлый период наблюдений за стоком и будущий период, на который распространяется предвидение. Допущение стационарности удовлетворительно согласуется с данными многолетних гидрометрических наблюдений. Анализ материалов наблюдений подтверждает также приемлемость допущения, что колебания годовых величин стока подчиняются закону больших чисел, т.е. определенному распределению вероятностей, не успевающему существенно измениться на протяжении десятилетий.

Распределение вероятностей годовых величин стока, а также других «фазовооднородных», т.е. относящихся в разные годы к сходным фазам годового цикла, характеристик стока выражается посредством некоторых разработанных теорией вероятностей математических функций. Выбор типа математической функции, выражающей распределение вероятностей величин стока, – задача, допускающая множество удовлетворительных решений. Строго говоря, каждому водосбору и каждому створу свойственны свои

законы колебания стока, зависящие от условий питания реки и продвижения потока по руслу. Отыскивается не точное выражение функции распределения, а приближение к ней, достаточно близкое; в определенном интервале колебаний. Исследования неразрывно связываются с анализом результатов наблюдений и выливаются в форму их обобщения.

Для расчетов стока в современной практике используются различные, преимущественно двухпараметрические распределения вероятностей, допускающие свободный выбор первых двух параметров: среднего x_0 и коэффициента изменчивости C_v ; параметры более высокого порядка жестко связываются с C_v . Основные из используемых типов кривых: гамма-распределение, логарифмически нормальное распределение, распределение экстремумов Гумбеля; последнее широко применяется в зарубежных странах – в основном во Франции и США (Крицкий, Менкель, 1950; Wen Te Chow, 1954; Блохинов, 1960; Гумбель, 1965).

В советской гидрологической практике получило распространение обобщенное трехпараметрическое гамма-распределение. Под этим названием понимается распределение, которому следует случайная величина x , если функция x^B подчиняется основному двухпараметрическому гамма-распределению. Трехпараметрическое гамма-распределение допускает колебания расходов воды от нуля до неограниченно больших величин, что представляется логичным применительно к речному стоку, имеет одну моду и определяется тремя выборочно оцениваемыми параметрами: средним x_0 , стандартом σ или коэффициентом изменчивости C_v и коэффициентом асимметрии C_s . Трехпараметрическое гамма-распределение было предложено в СССР в работах Крицкого и Менкеля (1946в, 1948а). Такой же тип распределения рассматривается в позднее опубликованной в США работе Стейси (Stacy, 1962). Для практического применения этого распределения составлены таблицы в широком диапазоне значения C_v и C_s (Коренистов, 1948; Блохинов, Никольская, 1964). Частными случаями его помимо основного двухпараметрического гамма-распределения являются экспоненциальное распределение, распределения f^2 Гудрича или Вейбулла и ряд других функций, используемых в прикладных дисциплинах. Накопленный к настоящему времени опыт дает основания считать, что гамма-распреде-

ние достаточно гибко и удовлетворительно описывает колебания многих практически нужных характеристик стока.

Первые два параметра распределений – среднее x и коэффициент изменчивости C_v – при наличии наблюдений за несколько десятилетий оцениваются непосредственно по данным о стоке в рассматриваемом гидрометрическом створе. Для установления третьего параметра – коэффициента асимметрии C_s обычно используется обобщенное суждение, основывающееся на совместном анализе данных по гидрологически сходным рекам; это связано с малой достоверностью выборочной оценки C_s по относительно коротким рядам.

Дальнейшие исследования должны полнее осветить законы распределения вероятностей различных стоковых характеристик рек разных гидрологических типов. Особенно важно исследовать распределение редко наблюдающихся экстремумов – максимальных расходов воды рек засушливых территорий, бассейнов со смешанным дождевым и горно-снеговым питанием, ливневых паводков.

Методы оценки параметров распределения вероятностных характеристик стока

Оценку параметров распределения вероятностей характеристик речного стока приходится производить, пользуясь относительно малочисленными варьирующими рядами, ограниченными числом лет гидрометрических наблюдений, имеющих по каждой отдельной реке. В связи с этим приобретает особое значение разработка методики, позволяющей извлечь из имеющихся в распоряжении данных максимум возможной информации.

Для численной оценки параметров распределения по данным наблюдений в гидрологии до сравнительно недавнего времени использовался почти исключительно метод моментов. В последние годы распространен метод наибольшего правдоподобия, который позволяет свести до возможного минимума случайные погрешности в оценках параметров. С.П. Крицким и М.Ф. Менкелем (1949) показано, что для гамма-распределения оценками правдоподобия служат среднее арифметическое и среднее геометрическое (или, что равносильно, среднее из логарифмов). Оценка C_v связана со средним из логарифмов зависимостью, которую легко представить в виде графика или таблицы (Крицкий, Менкель, 1949; Блохинов, 1964). Расчетные соотношения для вычисления оценок правдоподобия парамет-

ров \bar{x} , C_v и C_s трехпараметрического гамма-распределения более сложны; они освещены в работах Е.Г. Блохинова (1964, 1968). Для этих приемов составлены таблицы и номограммы.

Метод наибольшего правдоподобия в применении к оценке параметров трехпараметрических распределений приводит к сложным уравнениям, решение которых требует большой вычислительной работы. Поэтому заслуживает внимания постановка вопроса о разработке таких приемов оценки параметров, которые были бы просты в техническом отношении и в то же время практически не уступали в точности строгому методу наибольшего правдоподобия. В работе Е.Г. Блохинова (1968) предложены два таких приема применительно к трехпараметрическому гамма-распределению. Первый – для вычисления по ряду наблюдений оценок среднего x_0 и коэффициента изменчивости C_v при произвольно закреплённом отношении C_s/C_v , второй – для выборочной независимой оценки всех трех параметров: x_0 , C_v и C_s .

В дальнейшем следует рассмотреть применение метода наибольшего правдоподобия для получения оценок параметров коррелированных последовательностей.

Погрешности в оценке вероятных величин стока складываются из систематических отклонений, порождаемых неполным соответствием принимаемого распределения вероятностей по наблюдаемым в природе соотношениям, и из случайных ошибок, вызываемых непредставительностью (нерепрезентативностью) используемого стокового ряда. Три параметра достаточно жестко закрепляют очертание средней части кривой распределения вероятностей, характеризующей повторяемость обычных более или менее часто наблюдаемых величин стока. Результаты расчетов регулирования стока определяются преимущественно очертаниями именно этой части кривой распределения. Неточности расчета связываются главным образом со случайными ошибками, которые вызываются тем, что выборочные оценки параметров распределения неточно совпадают со значениями параметров, характеризующими генеральную совокупность. Выражения стандартных ошибок параметров гамма-распределения при оценке их методами моментов и максимального правдоподобия приведены в работах С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (1946в, 1968б) и Е.Г. Блохинова (1966).

Более полное суждение о свойствах распределения оценок (не только величины рассеяния, но и смещенности распределения и его асимметрии) предоставляет метод статистических испытаний (Монте-Карло). Этим путем можно получить представление о том, как колебались бы исследуемые величины, если бы они подчинялись тем или иным гипотетически предполагаемым закономерностям. Сопоставление результатов испытаний с наблюдениями за речным стоком позволяет проверить испытываемые гипотезы и отобрать, из них наиболее соответствующие природе. Применение метода статистических испытаний к неоднородному, коррелятивно связанному между собой и нестационарному материалу требует разработки специальных приемов.

Сопоставление распределений оценок C_v и C_s , вычисленных различными методами, позволило сделать некоторые принципиальные выводы. Выяснено, что при высокой изменчивости стока ($C_v > 0,4-0,5$) метод наибольшего правдоподобия приводит к результатам, существенно отличающимся от получаемых методом моментов. Во-первых, метод наибольшего правдоподобия дает возможность существенно повысить точность определения коэффициента изменчивости C_v по сравнению с ранее применявшимся для этой цели методом моментов. Во-вторых, распределения моментных оценок коэффициента асимметрии C_s и отношения C_s/C_v имеют большое отрицательное смещение, т.е. систематическую погрешность, измеряемую десятками процентов. Иными словами, метод моментов в таких случаях вообще теряет право на применение.

В последующем аналогичные исследования были проведены для ординат кривых распределения различной вероятности превышения – характеристик, получение которых является конечной целью гидрологического расчета (Блохинов, 1969). Результаты этих расчетов подтвердили только что указанные выводы.

Исследования показывают, что точность оценки среднего и коэффициента изменчивости по рядам наблюдений за несколько десятилетий более или менее приемлема для практики расчетов регулирования стока в отношении бассейнов с умеренно колеблющимся стоком (коэффициент вариации не превышает 0,5). При коэффициентах вариации, приближающихся к единице и тем более, превышающих ее, ошибки оценки названных параметров, особенно коэф-

фициента вариации, становятся нежелательно большими. Коэффициент асимметрии, как указано выше, оценивается обычно нормативно по его соотношению с коэффициентами вариации. Нормативное соотношение устанавливается на основании оценок по группам бассейнов рассматриваемого типа. Практически при умеренной изменчивости стока точность отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации относительно мало влияет на результаты стока и его регулирование.

При коэффициентах вариации, приближающихся к единице, это влияние становится существенным. Впрочем, совместная оценка всех трех параметров методом наибольшего правдоподобия позволяет приблизить достоверность выборочной оценки C_s к достоверности первых двух параметров.

Сущность нормативного определения параметров стока заключается в том, что относительная краткость непосредственных гидрометрических наблюдений по каждому отдельному объекту частично возмещается объединенным анализом наблюдений по группам – ансамблям гидрологически аналогичных объектов (Крицкий, Менкель, 1948а, 1956, 1970).

Первоочередная методическая задача – разработать приемы совместного анализа данных о стоке и связанных с ним явлениях по группам гидрологически родственных объектов. Такие приемы должны учитывать взаимную зависимость данных по различным объектам, относящихся к одной и той же эпохе. Они должны также дать возможность судить об общих закономерностях на основании неоднородного материала, относящегося к бассейнам разных размеров, с неодинаковым ландшафтом и климатом.

Другое направление исследований, позволяющее до некоторой степени приблизиться к пониманию сущности изучаемых явлений, заключается в развитии метода композиции, связывающего распределение вероятностей стока с вероятностями ближайших, непосредственно обуславливающих его факторов. Метод композиции открывает возможность более глубоко разобраться в том, какие сочетания метеорологических и гидрологических явлений приводят к формированию исключительно высоких половодий и паводков, периодов с чрезвычайно низким стоком и т.п.

Цикличность и периодичность в многолетних колебаниях стока

Решение многих гидротехнических задач зависит от порядка чередования и группировок маловодных и многоводных лет. В первую очередь это относится к многолетнему регулированию речного стока. По множеству рек земного шара прослеживаются затяжные серии маловодных и многоводных лет, практически невероятные в последовательностях независимых случайных величин. Частично можно объяснить это явление переходящими из года в год запасами влаги на водосборах, человеческой деятельностью и систематическими ошибками в подсчетах стока за ранние годы (Jevdjevich, 1964). Однако наблюдения за реками, где этих причин заведомо нет, показывают, что такие объяснения не исчерпывают вопроса.

По-видимому, определенное влияние на формирование затяжных маловодных и многоводных серий могут оказывать синоптические и гелиофизические процессы, что требует дальнейшего изучения (Калинин, 1968).

Многочисленными работами, первой из которых по времени была работа П.А. Ефимовича (1936), установлен тот факт, что коэффициенты корреляции между стоком смежных лет положительны для большинства бассейнов, располагающих длинными стоковыми рядами. Одиночные годы со стоком выше и ниже медианного наблюдаются значительно реже, чем можно было бы ожидать, исходя из допущения о статистической независимости колебаний. В противоположность этому отмечаются (Шарашкина, 1960) затяжные серии таких лет, почти невероятные при подобном допущении. К выводу о его несоответствии наблюдаемым в природе соотношениям пришел также Херст (Hurst, 1952), изучавший наивысшие за год уровни Нила и ряд других исследователей.

При современном уровне знаний последовательности годовых величин стока можно приближенно представлять как простые цепи Маркова (Крицкий, Менкель, 1946в). Коэффициент корреляции между стоком смежных лет в среднем по многим бассейнам, по-видимому, близок к 0,3 (на реках, регулируемых большими озерами, он может быть значительно больше). Имеющиеся в настоящее время данные не позволяют сделать определенных выводов относительно вида корреляционной функции. В этой связи необходимо отметить

исследования Д.Я. Ратковича (1968а, б, 1969, 1970), направленные на отыскание наилучшей математической модели для описания многолетних колебаний речного стока.

Величины стока существенно положительны. Распределение их вероятностей асимметрично и отличается от нормального. Между тем современная теория корреляции разработана преимущественно для нормальных распределений. В работе Е.Г. Блохинова и О.В. Сарманова (1968), специально поставленной в связи с исследованием колебаний речного стока, рассмотрены соотношения, характеризующие корреляцию величин, подчиняющихся гамма-распределению. «Гамма-корреляция» более, чем нормальная корреляция, соответствует природе зависимостей между существенно положительными величинами, к которым принадлежит, в частности, речной сток. Исследования в этом направлении следует продолжить. Их результаты могут послужить ценным инструментом математического описания закономерностей, проявляющихся в чередованиях периодов различной водности.

Попытки обнаружить периодичность в колебаниях речного стока многочисленны в гидрологической литературе (Андреянов, 1959; Алехин, 1963; Хомерики, 1964; Дружинин др., 1966; Афанасьев, 1967; Маматканов, 1967). Многие авторы утверждают, что в колебаниях стока рек различных континентов и климатических поясов ими обнаружены периоды разной длительности. Однако при накоплении данных о стоке за последующие годы периодичность, как правило, нарушается. Основная трудность заключается в том, чтобы доказать, что намечающиеся признаки периодичности возникают не в силу случайных особенностей конкретного отрезка времени, когда велись наблюдения, а могут рассматриваться как закономерности, распространяемые на будущее.

Методика вероятностных расчетов стока, а также других подобных ему явлений природы – атмосферных осадков и т.п. – страдает известным формализмом. Корни его заложены глубоко. Они связаны с тем, что геофизика при современном ее развитии не объясняет и не выражает количественные причины, по которым климатические и гидрологические явления колеблются по тем законам, какие наблюдаются в природе. Выводы о закономерностях колебаний стока стали бы более достоверными, если бы удалось связать их с

геофизическими и гелиофизическими факторами, такими, как изменения солнечной активности и т.п. До настоящего времени попытки этого рода не привели, насколько известно, к убедительным результатам. Такое положение непосредственно связано с тем, что не решены многие принципиальные проблемы климатологии. Нет единого мнения о причинах и закономерностях климатических изменений как проявлений естественных геофизических процессов и о состоянии климата, ожидаемом в ближайшие десятилетия. Недостаточно исследовано, как влияют на климат и если влияют, то в какой мере такие, порожденные человеческой деятельностью явления, как сжигание современными промышленными установками больших масс топлива, увеличивающие, по-видимому, содержание углекислоты в атмосфере, изменение растительного покрова и т.п.

Регулирование стока

Общие положения

Регулирование речного стока водохранилищами ведется для того, чтобы увеличить водоносность рек в периоды, когда она не покрывает потребности, чтобы уменьшить высоту паводков и паводков, угрожающих наводнениями, или для достижения этих целей вместе. Расчеты регулирования стока дают материал, необходимый для определения требуемых размеров водохранилищ и оптимального режима их наполнения и опорожнения. Этот материал служит для выбора параметров гидротехнических сооружений, для определения режима их работы и народнохозяйственного эффекта, получение которого есть цель водохозяйственных и водноэнергетических установок, а также для оценки влияния, оказываемого измененным гидрологическим режимом на природу и хозяйство прилегающих территорий. Непосредственная цель расчетов регулирования – предвидеть различные стороны режима работы водохозяйственной установки – расходы воды, предоставляемые потребителям и сбрасываемые вхолостую, колебания уровней водохранилища, напоров, выработки энергии и мощности гидроэлектростанций и другие явления.

В начале 30-х годов регулирование речного стока стало для нашей страны насущной народнохозяйственной потребностью, в то же время совершенно неразработанной проблемой был расчет водохранилищ, предназначенных для многолетнего регулирования.

Простейший эмпирический подход к решению этой задачи – расчет по стоку периода гидрометрических наблюдений – дает при регулировании, приближающемся к полному, неустойчивые, сильно изменяющиеся в зависимости от случайного сочетания маловодных лет результаты. Теоретическая основа методики расчета водохранилищ многолетнего регулирования непосредственно связана с представлениями о закономерностях колебаний стока. Установление факта, что многолетние его колебания хорошо описываются как случайный процесс, открыло возможность построения теоретически обоснованной методики расчетов регулирования. Первые американские работы этого направления носили эмпирический характер и не раскрывали сущности явления (Hazen, 1914; Sudler, 1927). Более глубокий анализ процессов регулирования был связан с применением методов композиции распределений, т.е. с исследованием вероятностных соотношений, проявляющихся в колебаниях стока за группы последовательных лет. Такой подход наметился в СССР в 1930–1932 гг. в работах С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (1932). Подход этот, интересный как первая попытка применить к расчетам регулирования композиционные методы, сохраняет значение поныне, давая возможность оценить повторяемость затяжных многоводных и маловодных периодов, свойственных режиму рек. В применении собственно к расчету водохранилищ прием 1930–1932 гг. был несвободен от некоторых неточных допущений. Корректное решение задачи многолетнего регулирования стока было дано С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем (1935); в последующем оно было дополнено авторами так, чтобы охватить больший круг расчетных случаев (Крицкий, Менкель, 1940, 1946а).

В этот же период были опубликованы работы П.А. Ефимовича (1936), обратившего внимание на наличие коррелятивной связи между стоком смежных лет; А.Д. Саваренского (1940), предложившего плодотворную идею исследования вероятностей различных элементов водохозяйственного режима путем построения кривых обеспеченности наполнений водохранилища за последовательные годы; Г.П. Иванова (1946а, б); Я.Ф. Плешкова (1939); С.И. Рыбкина (1938, 1946а); В.Г. Айвазяна (1941) и многих других исследователей.

Разработка и совершенствование вероятностных методов расчета регулирования стока (точнее, методов определения необходимой

емкости водохранилища при заданных параметрах стока и потребления или, наоборот, водоотдачи при заданной емкости водохранилища), занимавшие главное место в предвоенных исследованиях, продолжались и в последующие годы. Они ведутся до настоящего времени параллельно с исследованиями по уточнению известных и выявлению новых закономерностей в колебаниях речного стока. По этим проблемам опубликовано много наших и зарубежных работ (Андрянов, 1948, 1954; Саваренский, 1951; Moran, 1955; Крицкий, Менкель, 1957; Langbein, 1958; Сванидзе, 1961, 1964; и др.).

Вместе с тем в послевоенный период развиваются ранее почти не затрагивавшиеся разделы теории регулирования речного стока. Так, большое внимание уделяется исследованию водопотребления, особенностей его в разных отраслях народного хозяйства и влияния этих особенностей на параметры и режим водохозяйственных установок; анализируются требования различных водопотребителей к режиму и надежности водообеспечения и ущерба, наносимые ограничением водоподачи; выделяются характерные типы водопотребления и соответствующие им типы регулирования стока, наиболее целесообразные в тех или иных гидрологических условиях (Крицкий, Менкель, 1950б, 1952, 1958; Гильденблат, Казак, 1950; Коренистов, 1950; Фельдман, 1956; Чокин, 1958; Великанов и др., 1960; Великанов, 1963; и др.).

Усиленно разрабатываются проблемы, связанные с реализацией проектных планов регулирования стока в условиях эксплуатации, приобретающие все большее значение по мере увеличения числа действующих в стране водохранилищ и усложнения водохозяйственных систем. Вопросы управления водным режимом подробно рассматриваются как в общих трудах по теории регулирования стока (Никитин, 1949; Потапов, 1951; Крицкий, Менкель, 1952; Бахтияров, 1961; Плешков, 1961), так и в специальных исследованиях (Крицкий, Менкель, Коренистов, 1950; Morlat, 1951; Крицкий, Менкель, 1959; Цветков, 1962).

Исследуются вопросы расчета рациональной эксплуатации сложных водохозяйственных систем, в состав которых входят водохранилища многоцелевого назначения, каскады совместно работающих установок, водохранилища и гидроэлектрические станции, расположенные в разных речных бассейнах и т.п. (Гильденблат, Коренистов, 1960; Павлов, 1960; Крицкий, Менкель, 1961; Калачев, 1965; Обрезков,

1965; сб. Оптимальные режимы..., 1966; Мечитов, Гершкович, 1967; Цветков, 1967; Фельдман и др., 1969).

Регулирование стока рассматривается при этом как специфический технологический процесс, посредством которого достигается надлежащее использование природных, колеблющихся во времени водных ресурсов в народном хозяйстве. Цель изучения состоит в том, чтобы, с одной стороны, обеспечить уверенное (при современных представлениях о речном стоке и его колебаниях) ведение этого процесса, а с другой – по возможности усовершенствовать его так, чтобы достигать наилучших экономических результатов.

Характеристика водопотребления

Всякое потребляющее воду предприятие работает наиболее эффективно при некотором оптимальном режиме водопотребления. Колебания речного стока вынуждают ограничивать потребление воды при наступлении маловодья. Ограничения влекут за собой материальный ущерб. В основе оценки ущерба лежит стоимость народнохозяйственных резервов, которые нужно создать, чтобы компенсировать недоотпуск продукции предприятиями, обслуживаемыми данной водохозяйственной установкой. Закон нарастания ущерба при изменении водоподачи от оптимальной величины до нуля есть основная экономическая характеристика потребляющей части водохозяйственной системы – предприятий, использующих воду или гидроэнергию. Он определяет целесообразный режим регулирования стока.

Крайние теоретически мыслимые типы водопотребителей могут быть названы предельно жесткими и предельно гибкими.

Предприятия первого типа работают только при получении оптимального количества воды, всякое снижение водоподачи приводит к остановке производства, увеличение же ее сверх оптимума не используется. Ограничение водоподачи независимо от его размеров вызывает, таким образом, ущерб, соответствующий выключению полной производительности предприятия. Продукция предприятий второго типа возрастает пропорционально потребляемому количеству воды во всем интервале от нуля до наибольшей возможной к использованию величины. При ограничении водопотребления суммарный ущерб пропорционален недоданному количеству воды;

удельный, т.е. отнесенный к единице объема недоданной воды, ущерб постоянен во всем интервале ее от максимума до нуля.

Для реальных водопотребителей зависимости между водоподачей и ущербами от ее ограничения сочетают в тех или иных соотношениях закономерности, свойственные предельным типам водопотребления. Обычно предприятие не может работать, т.е. терпит максимальный ущерб, пока водоподача не достигнет некоторой минимальной величины. С пуском предприятия ущерб от недодачи воды скачкообразно уменьшается. При дальнейшем увеличении водоподачи до оптимума производительность предприятия растет по закону, более или менее близкому к линейному. Это – простейшая схема. В более сложных случаях по мере удовлетворения основных потребностей производства эффективность дальнейшего увеличения водоподачи уменьшается; в таких случаях удельные ущербы от ограничения потребностей тем больше, чем значительнее ограничения.

При использовании колеблющегося во времени речного стока каждому сочетанию параметров водоисточника и регулирующего водохранилища (если оно есть в водохозяйственной системе) отвечает некоторый предел практически бесперебойной водоподачи. Если потребность в воде превышает его, то необходимо либо создать или увеличить водохранилище, либо привлечь новый водоисточник, идя на дополнительные затраты, либо допустить возможность ограничения водоподачи в маловодные периоды, идя на дополнительные ущербы. Критерием, определяющим целесообразные соотношения между этими ущербами и дополнительными затратами, т.е. при заданных параметрах стока и водохранилища – возможные размеры нормального водопотребления, служит расчетная обеспеченность последнего. Расчетная обеспеченность может измеряться объемом поданной воды, длительностью бесперебойных периодов, числом бесперебойных лет и выражается обычно в процентах, отнесенных к полному потреблению при бесперебойном водоснабжении; в применении к будущему эксплуатационному периоду она характеризует математические ожидания соответствующих величин. Наиболее полный измеритель надежности водоснабжения – объем поданной воды, наиболее удобный и чаще всего применяемый – доля бесперебойных лет.

Теоретически расчетную обеспеченность следовало бы в каждом случае устанавливать технико-экономическим расчетом. В связи с трудностью оценки ущербов, причиняемых хозяйству ограничениями в водоснабжении, на практике расчетная обеспеченность устанавливается, как правило, нормативно. В отечественной практике системы промышленного и коммунального водоснабжения рассчитываются обычно на обеспеченность 95–99% по вероятности бесперебойных лет.

Для отраслей хозяйства, где некоторое ограничение водоподачи не влечет резкого уменьшения продукции (например, орошаемое земледелие, гидроэнергетика), норматив обеспеченности снижаете: до 75–90%. При этом, однако, часто оговаривается, что подача воды на-основные нужды потребителей (обычно 70–80% полной нормы) должна быть гарантирована с высокой надежностью. В некоторых случаях (например, при лиманном орошении) считают приемлемой даже обеспеченность 30–50% по вероятности бесперебойных лет. Равным образом в проектной практике последнего времени существенно смягчаются требования к надежности энергоотдачи гидроэлектростанций, включаемых в современные большие энергообъединения; если доля ГЭС в суммарной мощности системы относительно невелика, и частичное выпадение гидравлической мощности из-за недостатка воды может быть в большинстве случаев компенсировано без ущерба для потребителей за счет резервной мощности.

Нормативные значения в известной мере обосновываются опытами экономического расчета. Современные нормативы расчетной надежности водо- или энергообеспечения отнюдь нельзя считать совершенными. Они установлены во многом интуитивно, без достаточного экономического анализа; попытки провести такой анализ (там, где они предпринимались) пока что сопряжены с необходимостью значительной схематизации условий потребления воды и энергии сравнительно с реальной действительностью и опираются на очень условные оценки ущербов. Некоторые отраслевые нормативы, принятые 20–30 лет тому назад, уже не отвечают современному развитию этой отрасли хозяйства и нуждаются в обоснованном пересмотре.

Наконец, нельзя признать вполне удовлетворительным и самый подход к нормированию, когда требуемая степень бесперебойного водо- или энергоснабжения связывается только с типом потребите-

ля. Рациональная система нормирования должна учитывать обе стороны водохозяйственной системы: и потребителя, и источник. С этой точки зрения, чем больше затраты, необходимые для достижения высокой обеспеченности, тем ниже должен был бы быть при прочих равных условиях ее экономически оправданный норматив. При таком подходе следовало бы нормировать не непосредственно расчетную обеспеченность водоподачи, а удельный ущерб, который потребляющие предприятия различных типов несут от недополучения 1 м³ воды. Нормативы такого типа сделали бы возможным индивидуальный выбор расчетной обеспеченности для каждой водохозяйственной системы. Конечно, при переходе к такой системе нормирования потребовалось бы, с одной стороны, проводить в составе каждого проекта довольно сложные и трудоемкие технико-экономические расчеты, а с другой – постоянно уточнять нормативы удельных ущербов в соответствии с изменением технологии и экономики в различных отраслях производства.

Требования к режиму регулирования стока, предъявляемые различными предприятиями и их комплексами, в настоящее время не всегда могут быть установлены с желательной точностью. Уточнение и обоснование этих требований, выражение их в форме, соответствующей методам описания речного стока и расчетов его регулирования, есть задача дальнейших исследований. Решение ее затрагивает технологию и экономику не только самих установок, использующих речной сток, но и многообразных водопотребителей и водопользователей. Экономика каждого предприятия сложно связана с народным хозяйством в целом. Так, снижение мощности ГЭС изменяет работу энергосистемы; в одних случаях оно может быть компенсировано ее резервами, в других же (при недостаточности резерва) приводит к уменьшению продукции снабжаемых энергией предприятий, в свою очередь связанных с множеством отраслей хозяйства, и т.п.

Выяснить экономические последствия тех или иных изменений в работе данной установки очень трудно. Тем не менее, исследовать соотношения между источниками и потребителями воды необходимо, и нужда в этом все возрастает по мере усложнения водного хозяйства. Необходимо разрабатывать методы, которые позволят отчетливо и обоснованно формулировать требования сложного

индустриализированного народного хозяйства и отдельных его отраслей к источникам воды. Задача эта должна решаться совместно специалистами по водному хозяйству, технологами и экономистами.

Планы регулирования стока и их реализация

Регулирование речного стока, как указано, может иметь целью увеличение количества используемых водных ресурсов и повышение качества их использования либо срезку максимальных расходов воды в реке ниже водохранилища (для борьбы с наводнениями или для уменьшения размеров и удешевления водосбросных сооружений). Зачастую стремятся использовать водохранилище по возможности и для той, и для другой цели.

Регулирование, направленное на увеличение и улучшение использования водных ресурсов, различается по степени перераспределения естественного стока во времени (суточное, недельное, сезонное, многолетнее). Эта степень при равных условиях водопотребления зависит от соотношения между колебаниями стока используемой реки и емкостью водохранилища. Водоохранилище, способное к той или иной из высших степеней регулирования, ведет, если это требуется, и регулирование низших степеней. Граница между сезонным и многолетним регулированием в известной мере условна. При проектировании в качестве ее обычно принимают емкость, необходимую для полного перераспределения годового стока расчетной обеспеченности по графику водопотребления. В реальных эксплуатационных условиях некоторое перераспределение стока между смежными годами ведут иногда и водохранилища относительно меньшей емкости.

Схема, или режим, регулирования стока зависит, как уже указывалось, от характера водопотребителей и их экономической характеристики.

При предельно жестком водопотреблении задача регулирования состоит в поддержании некоторого оптимума (он же максимум и допустимый минимум) водоэнергоснабжения. Величина этой оптимальной водоподачи зависит при прочих равных условиях от ее расчетной обеспеченности: она тем меньше, чем выше расчетная обеспеченность, т.е. чем больше ущерба, вызываемые остановкой снабжаемых предприятий при любом уменьшении водоподачи.

Наиболее целесообразен в этом случае так называемый одноступенный план регулирования – поддержание постоянной оптимальной водоподачи до исчерпания запаса воды, а затем полное прекращение ее и возобновление в полном размере при наступлении многоводного сезона (или перед началом его, если это позволяет запас воды, накопленный за время бездействия). К одноступенному плану регулирования близок режим водохранилищ, обслуживающих водоснабжение или обеспечивающих на реках заданную судоходную глубину путем попусков.

При предельно гибком водопотреблении, когда колебания водоподачи от нуля до наибольшего используемого (оптимального) расхода не влияют на экономический эффект установки, задача регулирования заключается в максимальном использовании водных ресурсов, т.е. в предельном уменьшении объема холостых сбросов воды. Наиболее целесообразный план регулирования состоит в том, чтобы поддерживать оптимальную водоподачу до полной сработки водохранилища, как и при жестком водопотреблении, а затем использовать приток, увеличивая водоподачу до максимума по мере его увеличения и наполняя водохранилище только избытками воды. Обеспеченность оптимальной водоподачи не имеет в рассматриваемом случае существенного значения, так как целесообразная величина максимально используемого расхода определяется соотношением между затратами на увеличение производительности установки и достигаемым при этом приростом продукции. К такому плану регулирования (если не учитывать ограничений, связанных с рабочим напором) приближается режим работы гидроэлектростанции в смешанной энергосистеме, располагающей избытком мощности, но заинтересованной в максимальной экономии топлива.

Предельные схемы регулирования в чистом виде практически не встречаются. Чаще всего оказывается наиболее целесообразным обеспечивать некоторую водо- или энергоотдачу для удовлетворения важнейших, основных требований потребителей воды и стремиться к использованию возможно большей части остальных водных ресурсов для покрытия менее ответственных нужд. Этому наиболее распространенному в практике случаю соответствуют двухступенные, а иногда (если система обслуживает нескольких водопотребителей с разными требованиями к надежности водоснабже-

ния или если основной потребитель в состоянии дифференцировать требования к размерам водоподачи в зависимости от ее обеспеченности) и многоступенные планы регулирования. Они сочетают в себе в тех или иных соотношениях элементы обеих предельных схем. Типичный пример двухступенного плана – план работы гидроэлектростанции в смешанной энергосистеме, заинтересованной в полноценном использовании гидравлической мощности для покрытия потребительской нагрузки. В подобных случаях гарантийный режим расходования воды обеспечивает надлежащее участие ГЭС в покрытии максимума нагрузки; падение выработки гидроэнергии ниже гарантийного минимума может при недостатке резервов в системе привести к отключению потребителей. Выработка гидроэнергии сверх гарантийного минимума дает возможность уменьшать загрузку тепловых станций системы и экономить топливо.

Реализовать эффект регулирования стока с максимальным приближением к теоретическому оптимуму, возможному при заданных пределах предвидения стока, можно только при условии, что работа каждого водохранилища подчинена рациональным правилам, определяющим порядок накопления и расходования воды в зависимости от гидрологической обстановки и требований водопотребителей. Опыт показывает, что отсутствие или несоблюдение таких правил, особенно при многолетнем регулировании, может привести (и порой приводит) к значительным народнохозяйственным ущербам.

В реальных схемах регулирования, как уже отмечалось, обычно требуется и гарантировать некоторый минимум водоотдачи, и предусматривать использование возможно большей части располагаемого речного стока. В подобных условиях целесообразная величина водоотдачи в каждый данный момент определяется сочетанием следующих факторов, которые и должны учитываться правилами работы водохранилища: а) предстоящее водопотребление; б) предстоящий сток (приток в водохранилище, а также нерегулируемый сток, если он учитывается в балансе водохозяйственной системы); в) наличные запасы воды (с учетом требований, предъявляемых к уровенному режиму водохранилища).

Запас воды в водохранилище в каждый данный момент известен. Предстоящая потребность в воде или энергии, равно как и требова-

ния водопользователей к уровням, могут быть в условиях планового хозяйства оценены с приемлемой точностью. Предстоящий сток может служить аргументом правил расходования воды лишь в той мере, в какой обеспечено его предвидение, в действительных условиях ограниченное как по заблаговременности, так и по точности.

Предвидение речного стока опирается, во-первых, на его годовой цикл и, во-вторых, на зависимости, служащие основой срочного прогноза. Учет сезонных закономерностей стока позволяет индивидуализировать в правилах зависимость между водоотдачей и запасом воды для различных сезонов года. Этот принцип лежит в основе широко применяемых сейчас так называемых диспетчерских графиков работы водохранилищ. Аргументами диспетчерского графика служат наполнение (объем или уровень) водохранилища и время года (календарь) как характеристика предстоящих стока и потребления (предельные величины полезной водоотдачи в каждый момент годового цикла считаются заданными, сток обычно считают известным в пределах ближайшего короткого интервала – декады или месяца). Применительно к двухступенному плану регулирования основное назначение диспетчерского графика – выделить в нижней части рабочей призмы водохранилища переменный по времени запас воды, необходимый и достаточный для поддержания гарантийного режима с заданной надежностью. Падение запаса воды ниже диспетчерских величин (обозначаемых на графике, так называемой противоперебойной линией) служит указанием на необходимость перехода на гарантийный режим водоподдачи, во избежание перебоя. Пока уровень водохранилища находится выше противоперебойной линии, допустима большая водоотдача (так называемый режим расходования относительных избытков воды). При многоступенных планах регулирования число диспетчерских линий увеличивается.

Вероятностный смысл этих построений заключается в оптимизации соотношений между математическими ожиданиями ущерба, вызываемого, с одной стороны, преувеличением, а с другой – уменьшением предстоящего стока.

Когда в задачи водохранилища входит не только водо- или энергообеспечение, но и борьба с наводнениями, противоречия между целями регулирования обостряются, а правила управления водным режимом соответственно усложняются.

Целесообразное применение диспетчерских графиков позволяет реализовать основную долю теоретически возможного (для данного водохранилища) эффекта регулирования. Дальнейшее усовершенствование правил регулирования связано с применением гидрологических прогнозов. Вероятностный смысл прогноза – в переходе от безусловного распределения величин предстоящего стока к их условному распределению, учитывающему зависимость будущего стока от факторов, уже проявившихся ко времени составления прогноза. Прогнозы стока при нынешней их заблаговременности не могут повлиять на гарантийный режим водоподачи. Они, однако, могут быть полезны перед наступлением маловодья, выходящего за пределы расчетной обеспеченности и грозящего перебоем в водоснабжении. При заблаговременной экономии воды можно уменьшить глубину перебоя.

Основной эффект прогнозов стока, особенно при многолетнем его регулировании, заключается в возможности улучшить использование избытков воды. В предвидении высокого половодья можно увеличить водоотдачу и сработать водохранилище глубже, чем допустимо при незнании предстоящего притока; освободившаяся емкость будет заполнена избытками притока, которые, не будь ее, пришлось бы сбросить вхолостую.

Предсказание стока связано с возможностью ошибки. При назначении режима предполоводной сработки особенно опасны ошибки в сторону преувеличения ожидаемого стока, так как следствием их может быть недонаполнение водохранилища и срыв гарантийного режима. Чтобы избежать этого, нужно уменьшить ожидаемый сток на величину возможной ошибки прогноза. Эффект прогноза тем меньше, чем ниже его точность, а она резко снижается с увеличением срока предварения. Глубокая сработка водохранилища многолетнего регулирования требует, с учетом режимных ограничений, длительного времени, исчисляемого месяцами. При такой заблаговременности реальная эффективность прогноза в современных условиях невысока. При составлении прогнозов следует объективно оценивать и сообщать потребителям величину возможной ошибки. Особое внимание должно уделяться тем прогнозам, при составлении которых удастся достичь высокой точности. Оперативное значение таких прогнозов велико даже при небольшой их заблаговременности.

Дальнейшие исследования в области управления режимом работы водохранилищ следует направить в первую очередь на усовершенствование методики разработки правил регулирования стока, которые позволяли бы в эксплуатационных условиях в каждый момент назначать режим (расход воды, выработка энергии и т.п.), обеспечивающий наибольший экономический эффект при соблюдении прочих (санитарных и др.) требований к водохранилищу. Следует расширять исследования по экономическому обоснованию правил регулирования; цель последних – свести к максимуму математическое ожидание алгебраической суммы положительного эффекта от создания и работы рассматриваемой установки и отрицательного эффекта – ущерба, вызываемого отклонениями от оптимального режима снижением отдачи в маловодные периоды, холостым сбросом воды в многоводные. При решении этих задач следует использовать современные вычислительные средства. Правила регулирования должны в первую очередь учитывать сезонные, регулярно повторяющиеся из года в год изменения стока. Применение гидрологических прогнозов должно основываться на объективной количественной оценке вероятных (возможных) ошибок предсказания и на экономическом анализе последствий неточного прогноза.

Методы расчета регулирующих сток установок

Представления о колебаниях стока как о стохастическом процессе определяют вероятностный подход к решению задач, связанных с его регулированием. Предстоящие условия работы установок, использующих речной сток, характеризуются распределениями вероятностей элементов их режима: наполнений водохранилищ расходов воды, напоров и т.д. Приемы вероятностного расчета имеют целью с возможной точностью установить эти распределения.

При исследовании работы водохранилищ различают безусловно распределение вероятностей, характеризующее неограниченно длительную работу водохозяйственной системы при неизменных закономерностях колебаний стока и правилах расходования воды (стационарное распределение), и условные распределения, выражающие вероятности наполнений водохранилища и других характеристик его работы, ожидаемых через определенный срок после заданного начального наполнения.

Проектный режим работы систем, регулирующих речной сток обычно характеризуется стационарным распределением вероятностей наполнений водохранилища и связанных с ними водохозяйственных характеристик. В некоторых случаях, однако, именно нестационарный, меняющийся с течением времени режим работы водохозяйственной системы определяет обеспечение потребителей водой. Сюда относится, в частности, период начального наполнения водохранилища, который при большой его емкости может растянуться на несколько лет (так наполняется, например, большое Асуанское водохранилище в АРЕ). Аналогичное положение может возникнуть также в периоды, следующие за перебоем в работе водохранилища вследствие исчерпания запаса воды.

Исследования работы водохранилищ допускают два подхода к решению: 1) режим регулирования рассчитывается по наблюдаемому стоковому ряду; по результатам расчета, рассматриваемым как статистическая выборка, оценивается распределение вероятностей водохозяйственных характеристик; 2) режим регулирования рассчитывается путем анализа вероятностей различных чередований маловодных и многоводных лет и сезонов, проводимого либо путем композиции, либо путем статистических испытаний.

Расчет режима регулирующей установки по стоку периода гидрометрических наблюдений – старейший прием, широко применяемый и в настоящее время. Иногда в литературе встречается утверждение, что этот прием исходит из предпосылки о наличии точного и однозначного долгосрочного прогноза стока, т.е. не может быть назван вероятностным. Это утверждение ошибочно. Во-первых, вероятностными являются все приемы расчета, использующие период наблюдений за стоком как статистическую выборку и переносящие на будущее стохастические закономерности в колебаниях стока, наблюдаемых в прошлом. Во-вторых, диспетчерские правила работы водохранилищ, используемые при расчете их проектного режима, как уже отмечалось, учитывают предстоящий сток лишь в той мере, в какой предвидение его обеспечивается методами современной гидрологии.

Недостатки этого приема связаны с тем, что в основе выводов лежит только последовательность величин стока, зарегистрированная во время наблюдений. Между тем, оставаясь в пределах прини-

маемых допущений относительно закономерностей колебаний стока (распределения вероятностей, корреляционных связей), мы можем представить себе бесчисленное множество иных чередований лет и сезонов различной водности и соответственно иных условий работы водохранилища и оценок его регулирующей способности.

Приемы, основанные на анализе распределения вероятностей стока, этого недостатка не имеют. Такие приемы, условно называемые ниже обобщенными, позволяют теоретически оценить вероятности различных чередований водности рек и, исходя из этого, определить математические ожидания характеристик работы регулирующих сток водохранилищ. В результате исключается возможная систематическая ошибка, искажающая оценку регулирующей способности водохозяйственной системы при расчете по коротким гидрологическим рядам; вместе с тем уменьшается случайная составляющая ошибки, связанная с непредставительностью (нерепрезентативностью) имеющегося гидрологического ряда.

Следует, впрочем, отметить, что при значительной длительности наблюдений и неглубоком многолетнем и сезонном регулировании расчет по стоковому ряду дает вполне удовлетворительные результаты; во многих подобных случаях он даже предпочтительнее, так как позволяет полнее учесть колебания внутригодового распределения стока, нежели при расчете по обобщенным методам.

Как отмечалось выше, применяются два принципиально различных приема обобщенного расчета водохозяйственных систем: композиционный метод и метод статистических испытаний, известный в литературе под названием метода Монте-Карло.

Первое исходное положение обобщенных расчетов регулирования распределение вероятностей объекта регулирования естественного стока. Как отмечалось, вероятностное описание стока включает характеристики его годовых колебаний и сезонного распределения. Основная область применения обобщенных приемов – многолетнее регулирование. Многолетние колебания стока предъявляют наибольшие требования к регулирующим емкостям, необходимым для перераспределения его между обильными и недостаточными по воде годами. В особенности это относится к рекам засушливых территорий, где регулирование стока имеет первостепенное народнохозяйственное значение.

Второе исходное положение расчета – правила и закономерности расходования воды из водохранилища. В эту статью водного баланса входят полезное водопотребление, потери и холостые сбросы воды. Должны быть установлены зависимости этих величин от наполнения водохранилища, сезона года и других факторов.

Сущность композиционного метода сводится к следующему.

Анализ работы регулирующих сток установок основывается на элементарном соотношении между составляющими водного баланса: наполнение водохранилища в конце некоторого промежутка времени равно алгебраической сумме наполнения в начале рассматриваемого промежутка, притока воды за промежуток и расхода воды, включающего полезное потребление, потери и холостой сброс. Это положение распространяется и на распределение вероятностей. Положим, что известны распределения наполнений водохранилища в начальный момент некоторого промежутка времени и стока за этот промежуток, а также зависимости, связывающие затраты воды с влияющими на них факторами. Распределение наполнений в конечный момент рассматриваемого промежутка определяется композицией вероятностей начального наполнения и стока, уменьшенного на затраты воды. Композиция заключается в нахождении закона распределения суммы по заданным распределениям слагаемых. К решению этой задачи возможен двоякий подход. Первый – аналитический. Для некоторых теоретических распределений слагаемых в теории вероятностей установлен вид функции распределения суммы. Так, сумма нормально распределенных случайных слагаемых также распределяется по нормальному закону. Тип функции сохраняется и для сумм слагаемых, подчиняющихся гамма-распределению с одинаковыми коэффициентами вариации. Композиционный расчет сводится к вычислению параметров – итоговых распределений. Как известно, среднее суммы равно сумме средних слагаемых, дисперсия суммы равна сумме дисперсий слагаемых при их статистической независимости; при корреляции между слагаемыми к сумме дисперсий прибавляется удвоенная ковариация.

При решении некоторых задач можно, не зная строго вида функции распределения сумм, приближенно допускать, что она с практически достаточной точностью закрепляется значениями среднего

стандарта и коэффициента асимметрии. Удовлетворяющий этим параметрам и существу исследуемого явления тип кривой выбирается из числа применяемых теорией вероятностей.

Возможности применения аналитических методов композиции к исследованию работы регулирующих стоков водохранилищ ограничиваются особенностями процесса регулирования. Колебания объема воды, содержащейся в водохранилище, ограничены его полезной емкостью; наполнение не может превышать полной емкости, и не может быть меньше нуля (за нуль принимается мертвый объем водохранилища, опорожнение которого не допускается). Те же ограничения накладываются на распределение вероятностей наполнений. При этом предельные состояния – полное и пустое водохранилище – занимают более или менее существенные части многолетнего периода его работы; иными словами, вероятности их конечны. Вследствие этого распределение вероятностей наполнения водохранилища не описывается непрерывной функцией и не поддается простому математическому выражению. Тем самым затрудняется применение к исследованию работы регулирующих стоков водохранилищ аналитических приемов композиции.

Эти приемы все же применяются при решении некоторых задач регулирования. К числу их относится, в частности, исторически первый композиционный способ расчета водохранилищ, предложенный в 1932 г. С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем. Несмотря на некоторые неточные допущения, этот прием сохраняет определенный принципиальный интерес. Параметрические приемы композиции дают при некоторых допущениях законченное решение задачи о колебаниях уровня замкнутых водоемов, подобных Каспийскому и Аральскому морям (Крицкий, Менкель, 1946б, 1964; Асарин, 1964). Аналитические приемы композиции используются также в процессе расчета, учитывающего корреляцию между стоком смежных лет, по методу, предложенному С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем в 1957 г.

Другой подход к вероятностному расчету регулирования стока основывается на применении приемов численного приближенного интегрирования. Методы этой категории можно разделить на две группы. Первая из них включает расчетные способы, которые используют графо-аналитические приемы приближенного интег-

рирования для композиции распределений, характеризующих наполнения водохранилищ и поступающий в них сток. Методы второй группы решают задачу композиции путем составления систем уравнений, определяющих координаты некоторых точек искомой функции распределения, которая представляет результат композиции. Численные коэффициенты уравнений вычисляются приближенным интегрированием.

Отправные положения этих приемов сходны. Соответственно в принципе одинаковы и результаты расчетов. Различия могут возникать лишь как следствие неточностей приближенного интегрирования, свойственных тому или иному приему. Первое по времени корректное композиционное решение задачи многолетнего регулирования относится, как указано, к 1935 г. (Крицкий, Менкель, 1935). В настоящее время это направление представлено обширной как советской, так и зарубежной литературой (Рыбкин, 1938, 1946а; Крицкий и Менкель, 1940, 1946а, 1952; Саваренский, 1940, 1951; Langbein, 1958; Картвелишвили, 1959, 1967; Moran, 1955, 1959; Качмарек, 1963).

Подход к решению задачи композиции, сводящий приближенное интегрирование при построении стационарного распределения к системе уравнений, предложен П. Мораном (Moran, 1955) и Н.А. Картвелишвили (1967).

Разработанные вначале в предположении статистической независимости колебаний годовых объемов стока методы расчета водохранилищ были в дальнейшем развиты применительно к описанию многолетних колебаний стока, как простой цепи Маркова (Крицкий, Менкель, 1957; Lloyd, 1963).

Обобщенные зависимости между основными размерами и эффектом водохозяйственных установок сыграли большую роль в формировании теории регулирования стока. Важнейший вклад композиционного метода в гидротехническую практику – хорошо известные в литературе номограммы, связывающие между собой многолетнюю составляющую емкости водохранилища, величину отдачи и процент лет ее бесперебойного поддержания (Плешков, 1939; Гулий, 1964). Следует отметить, что первые номограммы, связывающие обобщенные параметры регулирования с характеристиками стока, были опубликованы в США А. Хазеном (1914). Построенные

чисто эмпирически и недостаточно строго, эти номограммы представляют в настоящее время только исторический интерес.

Расчет регулирования стока путем композиции вероятностей технически сложен и трудоемок, в особенности при учете коррелятивных связей между близкими по времени величинами стока, при сложных водохозяйственных системах и сложных правилах работы водохранилищ. Колебания каждого из элементов водохозяйственного режима представляются в форме распределений их вероятностей, которые оторваны от других элементов, что не дает общей картины проектируемого режима.

Другой, принципиально отличный, способ определения вероятностных характеристик режима водохранилищ – метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), впервые примененный в СССР еще в 30-х годах (Рыбкин, 1946б), но получивший развитие лишь в последнее время, когда появилась возможность использовать быстродействующие счетные устройства. Основные положения этого метода и область применения его к исследованию колебаний речного стока и к расчетам режима использующих его установок изложены в работе С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (1964б). Решение задачи в принципе таково. Устанавливаются распределение вероятностей величин стока и коррелятивные связи между стоком различных частей водохозяйственной системы и промежутков времени; производятся случайные выборки, по которым строятся искусственные стоквые ряды большой длительности, например 10 000 лет; при этом принимаются во внимание коррелятивные зависимости. Полученные многолетние моделирующие сток ряды служат основой водохозяйственных и водноэнергетических расчетов. По результатам последних строятся искомые распределения вероятностей режимных характеристик. Исследованиям этого рода посвящены работы Ч. Садлера (1927), С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (1946в), П. Морана (Moran, 1959), Г.Г. Сванидзе (1961, 1964), А.Ш. Резниковского (1964) и др.

Вероятностные методы – композиционные расчеты и статистические испытания вводят в анализ, в дополнение к гидрологическому ряду, множество вариантов режима водохозяйственной системы, отличающихся один от другого чередованием лет и сезонов различной водности; при этом в основе всех вариантов сохраняются распределения вероятностей стока и корреляционные связи, оцениваем-

мые по исходному гидрологическому ряду; в смысле уточнения этих распределений и связей рассматриваемые методы не привносят дополнительной информации сверх той, которая содержится в гидрологическом ряду. Соответственно эффективность применения вероятностных методов зависит от того, как различные водохозяйственные характеристики связаны с оценками статистических параметров. Некоторые характеристики связаны с ними функционально. Например, средняя за многолетний период выработка энергии гидроэлектростанции, использующей весь сток реки без холостых сбросов и работающей при постоянном напоре, пропорциональна среднему стоку, т.е. функционально связана с одним из основных статистических параметров. Очевидно, она расчетами по методу Монте-Карло не уточняется. Другие водохозяйственные характеристики зависят от статистических параметров не столь жестко. Такова, например, величина отдачи воды или энергии, которая бесперебойно обеспечивается на протяжении рассматриваемого периода при работе определенных водохранилищ, в особенности при многолетнем регулировании. Гарантируемая отдача зависит от особенностей чередования маловодных сезонов и лет, не полностью учитываемых оценками параметров, принятых для описания стока.

Таким образом, отклонения вычисленных по стоковым рядам водохозяйственных характеристик от их математических ожиданий могут рассматриваться как следствия двух причин. Первая из них та, что оценки принятых статистических параметров стока отклоняются от своих математических ожиданий. Вторая причина – колебания водохозяйственных характеристик при определенных значениях параметров. Методы композиционного расчета и статистических испытаний тем более эффективны, чем менее тесна связь исследуемых водохозяйственных характеристик с оценками принятых статистических параметров стока. Эти методы позволяют также анализировать рассеяние результатов водохозяйственного расчета, зависящее от вариаций обеих категорий, что представляет самостоятельный интерес. Открывается возможность измерить, насколько условия работы водохозяйственной системы на протяжении предстоящих десятилетий ее эксплуатации могут отклониться от проектных предположений. Суждение об этом позволило бы правильно оценивать степень достоверности водохозяйственных построений, опе-

рирующих с явлениями природы, которые не поддаются точному предвидению.

Рациональная методика исследования работы регулирующих сток установок должна, вообще говоря, целесообразно сочетать приемы обеих категорий – приемы, основанные на непосредственном использовании гидрологических рядов, и приемы, которые вводят в анализ различные последовательности стока, более или менее вероятные при параметрах, полученных из наблюдений.

Календарная последовательность изменения водохозяйственных характеристик, построенная непосредственно по стоку периода наблюдений, обеспечивает в наиболее наглядной форме суждение о водохозяйственном режиме в целом. При расчетах сложных водохозяйственных систем, каскадов водохранилищ и гидроэлектростанций, когда выбор правильного решения затрудняется обилием факторов, подлежащих учету, и сложностью их взаимодействия, наглядность построений приобретает особую ценность.

Области применения различных приемов в основных чертах таковы: приемы, сводящиеся к непосредственному построению режима работы водохранилищ по многолетним рядам стока за период гидрометрических наблюдений, могут рассматриваться как достаточные при сезонном регулировании; приемы, основанные на исследовании вероятностей различных сочетаний стока, служат для определения основных характеристик многолетнего регулирования – соотношений между емкостью водохранилища, его гарантийной отдачей и расчетной обеспеченностью. Во всех случаях за расчетами по ряду наблюденных расходов воды сохраняется значение иллюстрации ожидаемого режима, очень важной для представления о взаимной связи между его элементами.

В случае сложных водохозяйственных систем единственная практически осуществимая возможность водохозяйственного расчета заключается в исследовании календарной последовательности стока. Расчет по гидрологическим рядам дополняется в необходимых случаях исследованиями вероятностей сочетаний стока. Выводы таких исследований используются преимущественно для определения основных характеристик многолетнего регулирования.

Метод статистических испытаний в применении к гидрологическим и водохозяйственным расчетам эффективен при решении

тех задач, к которым в принципе приложимы аналитические приемы вероятностного расчета, но практическое его выполнение затруднительно.

Исходя из этих положений, можно наметить такие направления дальнейших исследований: оценка точности различных методов расчета в применении к разным случаям регулирования и водохозяйственным характеристикам; в частности, следует подвергнуть анализу соотношения, которые в различных условиях гидрологического режима и водохозяйственных задач складываются между обобщенными вероятностными методами и приемами, оперирующими непосредственно гидрологическими рядами; отражение в методике расчета регулирования стока результатов исследований, углубляющих представление о закономерностях колебаний речного стока, более полно и правильно выражающих природу этих явлений и использующих соответствующий математический аппарат.

Сложные водохозяйственные системы

Развитие народного хозяйства сопровождается образованием сложных комплексных водохозяйственных систем, включающих регулирующие сток водохранилища, ирригационные системы, установки коммунального и промышленного водоснабжения, каскады гидроэлектростанций, судоходные пути, рыбохозяйственные устройства, каналы, перераспределяющие сток по территории. Элементы таких систем находятся в сложном взаимодействии между собой и с использующими водные ресурсы отраслями.

Установки, расположенные на одной реке, связаны между собой гидравлически. Отъем воды потребителями, задержание части стока водохранилищами или попуски из них сказываются на режиме всех нижележащих установок. Переброски стока, работа гидроэлектростанций, участвующих в энергосистемах, порождают взаимодействие установок, использующих сток различных бассейнов.

Все значительные водохозяйственные системы комплексны, т.е. обслуживают несколько отраслей народного хозяйства. Требования отдельных отраслей к режиму расходования воды, вообще говоря, не совпадают между собой и нередко противоречивы.

Компоненты водохозяйственных систем связаны в работе с предприятиями других типов. В особенности это относится к гидроэнерге-

тике. Гидроэлектростанции представляют собою элементы не только водного хозяйства, но также и энергетических систем, включающих установки других типов – тепловые, атомные электростанции и т.д.

Все сказанное придает водохозяйственным системам большую сложность. Разработка рациональных методов их построения и эксплуатации, выбор параметров и установление целесообразного порядка работы представляют собой одну из наиболее трудных задач водохозяйственной и водноэнергетической научной проблематики. Подход к ее решению следует рассматривать в трех аспектах. Должны быть а) разработаны приемы представления естественного гидрологического режима, определяющего условия работы исследуемых водохозяйственных систем; б) сформулированы технические и экономические требования к их зарегулированному режиму, предъявляемые водопотребителями и водопользователями; в) разработана методика технико-экономического решения оптимизационных задач по построению водохозяйственных систем и по управлению ими в проектной и эксплуатационной постановке.

В гидрологическом аспекте сложность задачи вытекает из множественности временных и пространственных зависимостей, связывающих гидрологический и гидравлический режимы различных участков речной сети и взаимодействующих водохозяйственных установок (водохранилища, гидроэлектростанции). Вероятностное описание стока крайне осложняется. Приходится рассматривать распределения вероятностей стока с частных водосборов (между плотинами) и учитывать коррелятивные связи между одновременными величинами стока с разных частных водосборов в сочетании с временными корреляциями для стока каждого из них.

Гидравлика потоков и условия продвижения по ним паводковых и паводковых волн резко изменяются. Подпор, создаваемый плотинами, увеличивает скорости распространения волн по длине рек. Сказываются также управляемые процессы наполнения и сработки водохранилищ. Вследствие этого режим стока регулируемых рек формируется существенно иначе, чем в естественных условиях.

Вероятностный расчет работы сложных систем композиционными методами практически неосуществим. Единственный в настоящее время применимый способ – расчет календарных последовательностей стока, по которым можно гидравлически проследивать

продвижение воды по руслам рек и учитывать важнейшие факторы, влияющие на режим регулирования. Основой таких расчетов служат наблюдаемые гидрологические ряды. В случае недостаточности их (при высоких степенях многолетнего регулирования и т.п.) могут оказаться полезными расчеты по искусственным стоковым рядам большой длительности, построенным по вероятностным закономерностям, свойственным наблюдаемому гидрологическому режиму (метод Монте-Карло). Необходимо помнить, однако, что такие искусственные ряды не могут служить для уточнения исходных выборочных оценок стоковых параметров.

Второй указанный выше аспект рассматриваемой задачи – формулировка и количественное выражение требований к режиму водохозяйственных установок со стороны водопотребителей и водопользователей; с этим неразрывно связано установление экономических критериев оптимальности. Важнейшая часть этого раздела – построение зависимости между количеством воды, предоставленной потребителям, и получаемым ими экономическим эффектом. Иными словами, задачу можно формулировать как определение ущербов от ограничения водопотребления. Задача эта сложна. Даже для отдельного предприятия, использующего определенный источник воды, связь между количеством израсходованной воды и производительностью предприятия не поддается простому выражению. В случае, например, сельскохозяйственного орошения урожайность зависит от множества взаимодействующих факторов; выделить влияние изменений в количестве поданной на поля воды – трудно поддающаяся решению, по существу вероятностная задача. Не менее сложна рассматриваемая задача в применении к работе гидроэлектростанций, участвующих в мощных энергосистемах, включающих множество различных электроцентралей, обладающих большим резервом мощности, обслуживающих разнородных потребителей. Приходится учитывать также, что при каскадном расположении гидроэлектростанций изменения режима верхних ступеней сказываются на нижележащих установках. Целесообразный порядок работы каждого водохранилища должен давать решение, оптимальное для энергообъединения в целом.

При комплексном использовании водных ресурсов режим работы установок регулирующих сток должен учитывать интересы всех

водопользователей (режим водоподдачи, урвненный режим в верхнем и нижнем бьефах и т.п.). При проектировании водохозяйственных систем в районах развитого орошаемого земледелия возникают вопросы, связанные с распределением воды между орошаемыми массивами, расположенными в разных частях бассейнов, и т.п.

Таким образом, требования к работе больших водохозяйственных систем гораздо сложнее, чем к работе водохозяйственных установок локального значения.

Еще с большими трудностями приходится сталкиваться при денежном выражении рассматриваемых зависимостей; в этой области нет полной ясности даже в отношении принципиального подхода к решениям.

Третий аспект исследования – разработка приемов, обеспечивающих отыскание оптимальных решений при построении и эксплуатации водохозяйственных систем.

Неправильно было бы считать, что оптимизация в смысле стремления найти наилучшие решения есть направление, возникшее лишь в последнее десятилетие в связи с совершенствованием счетных устройств. Разработка проектов водохозяйственных установок и правил их эксплуатации издавна предусматривала выбор наиболее целесообразных вариантов и решений; современные вычислительные устройства лишь существенно расширили возможности оптимизации.

Поиски наилучших решений при построении и эксплуатации водохозяйственных систем включают несколько концентроров.

Первый концентр – оптимизация режима работы водохозяйственной системы при заданных ее параметрах и заданном водопотреблении. Цель исследований этого концентрора – разработка оптимальных для данного состава водохозяйственных сооружений – водохранилищ, каналов, гидроэлектрических и насосных станций – правил распределения воды и сработки и наполнения водохранилищ. Правила устанавливают зависимость между расходом воды, подаваемой каждому из потребителей, и пропускаемой через водосбросные отверстия, с одной стороны, и водохозяйственной обстановкой, складывающейся к моменту применения правил, – с другой. Обстановка должна характеризоваться данными, которые будут известны эксплуатационному персоналу во время работы системы; в числе этих

данных – наполнение водохранилищ, предстоящее водопотребление и ожидаемый приток воды по реке. Суждение о нем основывается на характеристиках сезонных колебаний стока и использует гидрологический прогноз с неперменным объективным учетом его вероятной погрешности. Оптимизировать нужно именно правила работы водохозяйственной системы, так как именно они определяют порядок и эффективность будущей эксплуатации. Отыскание наиболее целесообразного режима за характерные годы, к чему иногда сводятся оптимизационные построения, имеет значение только как эталон для оценки эффективности правил.

Следующий концентр исследований – нахождение наиболее целесообразных параметров водохозяйственных сооружений. Каждый вариант параметров исследуется при оптимальном для него режиме, найденном в предыдущем концентре. Рассматриваемый концентр можно подразделить на оптимизацию размеров сооружений при заданном их составе и размещении (створы плотин и т.д.) и на отыскание наиболее целесообразного построения водохозяйственной системы.

Завершающий концентр исследований можно представить как оптимизацию всего комплекса, включающего водное хозяйство и потребляющие воду предприятия. Как и в предыдущем случае, каждый вариант должен рассматриваться при оптимальных решениях предшествующих концентров. В таком полном объеме задача переходит из области водного хозяйства в область общегосударственного планирования развития и размещения производительных сил.

Каждый из многочисленных вариантов работы водохозяйственной системы, которые подлежат исследованию в указанном порядке на каждом этапе планируемого развития народного хозяйства, должен рассматриваться применительно к различным вариантам возможной в будущем водности источников, в соответствии с вероятностными закономерностями колебаний речного стока. Задача оптимизации приобретает исключительную сложность и требует громадного объема вычислений. Необходимы упрощения и ограничения, которые, однако, не должны затрагивать основные соотношения. Разработка практически применимой методики оптимизационных построений – важнейшая задача предстоящих исследований.

За последние годы проведено много исследований в этой области. Некоторые из них перечислены в начале второго раздела статьи.

Преимущественное направление исследований – разработка техники оптимизационных расчетов, основанных на применении современных методов вычислительной техники, вызвало обостренный интерес, поставило ряд сложных задач и привлекло внимание исследователей. В итоге проведенных работ достигнуты важные результаты. Постановка оптимизационных расчетов на машинах потребовала четкой формализации задачи, установления состава и количественной оценки влияющих факторов. Выработалось отчетливое представление о том, какие данные и в какой форме нужны. Появилась возможность оценивать влияние возможной неточности в исходных технико-экономических показателях.

Основное, что в настоящее время сдерживает развитие оптимизационных построений – недостаточность исходной информации. Практическая ценность выводов оптимизационных расчетов целиком зависит от правильности исходных технико-экономических положений. Обоснование этих положений – первоочередная задача. Исследования могут дать полноценные результаты только при условии отчетливого и обоснованного установления требований к целесообразному режиму регулирования стока и достаточно полном учете факторов, влияющих на процессы регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазьян В.Г. Определение емкости водохранилища при регулировании стока. – Гидротехническое строительство, 1941, №2.
2. Алехин Ю.М. Статистические прогнозы в геофизике. Изд-во ЛГУ, 1963.
3. Андреев В.Г. Методика расчетов сезонного регулирования стока на основе кривой обеспеченности расходов. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 9(63), 1948.
4. Андреев В.Г. Обобщенный метод расчета сезонного регулирования стока. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 43(97), 1954.
5. Андреев В.Г. Циклические колебания годового стока и их учет при гидрологических расчетах. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 68, 1959.
6. Асарин А.Е. Уровенный режим Аральского моря при развитии водопотребления в бассейнах Сырдарьи и Амударьи. – Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964.
7. Афанасьев А.Н. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. М., «Наука», 1967.

8. Бахтияров В.А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. Л., Гидро- метеоиздат, 1961.

9. Блохинов Е.Г. Исследование повторяемости дождевых паводков. – Труды Гидропроекта, сб. 4, 1960.

10. Блохинов Е.Г. Оценка параметров случайных колебаний речного стока методом наибольшего правдоподобия. – Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964.

11. Блохинов Е.Г. Об особенностях распределения выборочных оценок параметров речного стока. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 134, 1966.

12. Блохинов Е.Г. Новые приемы для оценки параметров случайных колебаний речного стока по данным многолетних наблюдений. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 143, 1968.

13. Блохинов Е.Г. Об особенностях распределения оценок квантилей, вычисленных различными методами (применительно к расчетам речного стока). – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 162, 1969.

14. Блохинов Е.Г., Никольская Н.В. Расширенные таблицы трехпараметрического гамма-распределения. – Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964.

15. Блохинов Е.Г., Сарманов О. В. Гамма-корреляция и ее использование при расчетах многолетнего регулирования речного стока. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 143, 1968.

16. Великанов А.Л. Определение обеспеченной рабочей мощности группы ГЭС с учетом развития энергосистемы. – В сб.: Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока, вып. 11. М., Изд-во АН СССР, 1963.

17. Великанов А.Л., Дружинин И.П., Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Фельдман М.П. Методика экономического выбора обеспеченной мощности гидроэлектростанций. – В сб.: Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока. М., Изд-во АН СССР, 1960.

18. Гильденблат Я.Д., Казак В.Р. О выборе обеспеченности при расчете водохранилищ для промышленного водоснабжения. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. М., Изд-во АН СССР, 1950.

19. Гильденблат Я.Д., Коренистов Д.В. Расчет режима речного водохранилища с учетом негоризонтальности водного зеркала. – Труды Гидропроекта, сб. 4, 1960.

20. Гулий И.В. К уточнению графиков для определения многолетней составляющей емкости водохранилища с учетом связи между стоком смежных лет. – Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964.

21. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М., «Мир», 1965.

22. Дружинин И. П., Коноваленко З.П., Кукушкина В.П., Хамьянова Н.В. Речной сток и геофизические процессы. М., «Наука», 1966.

23. Ефимович П.А. Вопросы водохозяйственных расчетов и гидрологии. М., Госэнергоиздат, 1936.

24. Иванов Г.П. Метод расчета многолетнего регулирования стока. Труды I Совещания по регулированию стока. М., Изд-во АН СССР, 1946а.

25. Иванов Г.П. Некоторые частные задачи расчета многолетнего регулирования стока. Труды I Совещания по регулированию стока. М., Изд-во АН СССР, 1946б.

26. Калачев Н.С. О построении и управлении развитием комплексных водохозяйственных систем. – В сб.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 3. Алма-Ата, «Наука», 1965.

27. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л., Гидрометеоздат, 1968.

28. Картвелишвили Н.А. Статистический метод в теории регулирования речного стока. Труды III Всес. гидрологического съезда, Т. VI. Л., Гидрометеоздат, 1959.

29. Картвелишвили Н.А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л., Гидрометеоздат, 1967.

30. Коренистов Д.В. Кривые С.Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля для расчетов речного стока. – Гидротехническое строительство, 1948, №6.

31. Коренистов Д.В. Исследования к выбору обеспеченной и установленной мощностей гидростанции, работающей с суточным регулированием в энергетической системе. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. М., Изд-во АН СССР, 1950.

32. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока на основе теории вероятностей. – Труды ВИСУ, Гидротехнический сборник, №4, 1932.

33. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Многолетнее регулирование стока. – Гидротехническое строительство, 1935, №11.

34. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Обобщенные приемы расчета регулирования стока на основе математической статистики. – Гидротехническое строительство, 1940, №2.

35. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Математические методы расчета регулирования стока. Труды I Совещания по регулированию стока. М., Изд-во АН СССР, 1946а.

36. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Некоторые положения статистической теории I колебаний уровней естественных водоемов и их применение к исследованию режима Каспийского моря. – Труды I Совещания по регулированию стока. М., Изд-во АН СССР, 1946б.

37. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О приемах исследования случайных колебаний речного стока. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 29, 1946в.

38. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Выбор кривых распределения вероятностей для расчетов речного стока. – Изв. АН СССР, Отд. техн. наук, 1948а, №6.

39. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О соответствии теоретических кривых распределения вероятностей данным наблюдений по речному стоку. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1949б.

40. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О применении метода наибольшего правдоподобия к выборочной оценке статистических параметров речного стока. – Изв. АН СССР, Отд. техн. наук, 1949, №4.

41. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. М., Изд-во АН СССР, 1950а.

42. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Ущерб от ограничения водо- и энергопотребителей как фактор, определяющий целесообразные размеры водохозяйственных установок. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. М., Изд-во АН СССР, 1950б.

43. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты (регулирование стока, водохозяйственные и водноэнергетические расчеты). Л., Гидрометеоиздат, 1952.

44. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Об оценке вероятной повторяемости редко наблюдаемых гидрологических явлений. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 6. М., Изд-во АН СССР, 1956.

45. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивной связи между стоком смежных лет. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 8. М., Изд-во АН СССР, 1957.

46. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Нормирование обеспеченности и технология использования водной энергии. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 7. М., Изд-во АН СССР, 1958.

47. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Обзор французской периодической литературы по расчетам водохранилищ, обслуживающих гидроэлектростанции. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 8. М., Изд-во АН СССР, 1959.

48. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Об экономической оценке эффективности гидроэлектростанций. – Труды Гидропроекта, сб. 6, 1961.

49. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов. – Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964а.

50. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О применении метода статистических испытаний к исследованию колебаний речного стока и к расчетам режима использующих его установок. – В сб.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 2. Алма-Ата, «Наука», 1964б.

51. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Об основах теории регулирования речного стока. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 160, 1968а.

52. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 143, 1968б.

53. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Об оценке параметров распределения вероятностей по группам коррелятивно связанных гидрологических рядов. Труды ГГИ, вып. 180, 1970.

54. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Коренистов Д. В. Правила управления работой водохранилищ, обслуживающих гидроэлектростанции. – В сб.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. М., Изд-во АН СССР, 1950.

55. Маматканов Д.М. О методике сверхдолгосрочного прогнозирования вероятностных величин стока рек с использованием нормального закона распределения. – В сб.: Вопросы водного хоз-ва, вып. 11. Изд-во «Киргизстан», 1967.

56. Мечитов И.И., Гершкович М.И. Оптимизация использования водных ресурсов в дефицитных по воде бассейнах. – Гидротехника и мелиорация, 1967, №12.

57. Никитин С.Н. Методика водноэнергетических расчетов. М., Госэнергоиздат, 1949.

58. Обрезков В.И. Оптимизация длительных режимов работы ГЭС в каскаде и энергосистеме. – Труды Московского ордена Ленина энергетического ин-та, вып. XII, 1965.

59. Оптимальные режимы работы гидроэлектростанций в энергосистемах. – Докл. к научно-техн. совещ. Московского правления научно-техн. об-ва энергетической промышленности, ч. I и II, 1966.

60. Павлов С.П. Условия регулирования высокого стока. – Труды Гидропроекта, сб. 4, 1960.

61. Плешков Я.Ф. Быстрый и точный расчет водохранилищ. – Гидротехническое строительство, 1939, №6.

62. Плешков Я.Ф. Регулирование речного стока (водохозяйственные расчеты). Гимиз, 1961.

63. Потапов М.В. Регулирование стока. Сочинения, т. III. М., Сельхозгиз, 1951.

64. Раткович Д.Я. Закономерности чередования маловодных и многоводных лет, как основа расчетов регулирования речного стока. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 143, 1968а.

65. Раткович Д.Я. Закономерности чередования маловодных и многоводных лет как основа расчетов регулирования речного стока. Статья вторая. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 160, 1968б.

66. Раткович Д.Я. Закономерности чередования маловодных и многоводных лет как основа расчетов регулирования речного стока. Статья третья. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 162, 1969.

67. Раткович Д.Я. Закономерности чередования маловодных и многоводных лет как основа расчетов регулирования речного стока. Статья четвертая. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 180, 1970.

68. Резниковский А.Ш. Моделирование гидрологических рядов и расчет многолетнего регулирования стока каскадом ГЭС. Изв. АН СССР, серия «Энергетика и транспорт», 1964, №2.

69. Рыбкин С.И. Эмпирические формулы и номограммы для расчета многолетнего регулирования речного стока. – Гидротехническое строительство, 1938, №1.

70. Рыбкин С.И. Метод расчета на основе теории вероятностей основных водохозяйственных характеристик водохранилища при многолетнем регулировании стока. Труды I Совещания по регулированию стока. М., Изд-во АН СССР, 1946а.

71. Рыбкин С.И. Статистический опыт к расчету многолетнего регулирования стока на основе теории вероятностей и его результаты. Труды I Совещания по регулированию стока. М., Изд-во АН СССР, 1946б.

72. Саваренский А.Д. Метод расчета регулирования стока. – Гидротехническое строительство, 1940, №2.

73. Саваренский А.Д. Регулирование речного стока водохранилища-ми. М., Изд-во АН СССР, 1951.

74. Сванидзе Г.Г. Применение метода Монте-Карло к задачам регулирования речного стока. – Докл. АН СССР, 1961, Т. 140, №6.

75. Сванидзе Г.Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. Тбилиси, Изд-во АН Груз. ССР, 1964.

76. Соколовский Д.Л. Применение кривых распределения к установлению вероятных колебаний годового стока рек Европейской части СССР, 1930.

77. Фельдман М.П. Экономическое обоснование обеспеченной отдачи ГЭС. –] Труды Московского ордена Ленина энергетического ин-та, вып. XIX, 1956.

78. Фельдман М.П., Елаховский С.Б., Кудинов А.Г., Шарашкина Н.С., Бестужева К.Н. Оптимизация режимов комплексного использования водных ресурсов. В сб.: Выбор режима и параметров гидроузлов комплексного использования водных ресурсов. М., «Наука», 1969.

79. Хомерики И.В. К вопросу исследования циклических вариаций речного стока. – Сообщ. АН Груз. ССР, 1964, Т. 36, №3.

80. Цветков Е. В Использование гидропрогнозов при составлении диспетчерских графиков регулирования водохранилищ гидростанций. – Изв. АН СССР. Отд. технич. наук. – Энергетика и автоматика, №2, 1962.

81. Цветков Е.В. Расчет оптимального регулирования стока водохранилищами гидроэлектростанций на ЦВМ. М., «Энергия», 1967.

82. Чокин Ш.Ч. Расчетная обеспеченность работы гидроэлектростанций. – Изд-во АН Каз. ССР, 1958.

83. Шарашкина Н.С. Исследование цикличности годовых величин речного стока применительно к задачам гидроэнергетики. – В сб.: Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока. М., Изд-во АН СССР, 1960.

84. Foster H.A. Theoretical frequency curves and their application to engineering problems. – Trans. ASCE, 1924, v. LXXXVII.

85. Hazen A. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply. – Trans. Am. Society of Civ. Engineers, 1914.

86. Hurst H.E. The Nile, a general account of the river and utilization of its waters. London, 1952.

87. Jevdjevich V.M. Fluctuations of wet and dry years. Part 11, Analysis by serial correlation. Colorado State Univ. Hydrol. Papers, 1964, №4.

88. Качмарек З. Основы регулирования стока водохранилищами. Arch. Hydrotechn., Т. X, 1963 (на польском языке).

89. Langbein W.B. Queuing theory and water storage. – Proc. ASCE, Paper N 1811, 1958, V. 84.

90. Lloyd E.H. A probability theory of reservoirs with serially correlated inputs. – J. Hydrol., 1963, Sept.

91. Moran P.A.P. Probability theory of dams and storage systems. Austral. J. Appl. Sci 1954, V. V, 1955, V. VI.

92. Moran P.A.P. The theory of storage. London, 1959.
93. Morlat G. Sur la consigne d'exploitation optimum des reservoirs saisonniers. – Houille blanche, 1951, №4.
94. Stacy E.W. A generalization of the gamma distribution. Ann. Math. Statistics, 1962, №3.
95. Sudler Charles E. Storage requires for the regulation of stream flow. – Trans. ASCE, 1927.
96. Wen Te Chow. The Log – Probability curve and engineering application – Proc. ASCE, 1954, v. LXXX, separate №536.

Крицкий Сергей Николаевич

(31.12.1900 – 28.8. 1984)



Сергей Николаевич Крицкий – выдающийся учёный, один из основоположников теории гидрологических и водохозяйственных исследований, рационального управления и комплексного использования водных ресурсов, доктор технических наук, профессор, лауреат Сталинской премии.

Биография этого всемирно известного ученого и основные результаты его многогранной научной деятельности описаны в приведённой ниже статье, опубликованной к 110-й годовщине со дня рождения С.Н. Крицкого.

Сергей Николаевич Крицкий – один из основных создателей стохастической гидрологии и теории управления речным стоком (к 110-й годовщине со дня рождения)¹

А.Е. Асарин, Л.Ф. Сотникова

Почти три десятилетия, прошедшие после ухода из жизни Сергея Николаевича Крицкого, не только не ослабили чувства потери этого замечательного ученого и человека, но и четко выявили научный масштаб этой потери и непреходящую значимость его научного наследия.

Задача настоящей статьи – напомнить или рассказать читателю, особенно родившемуся или пришедшему в инженерную и/или научную жизнь после смерти С.Н. Крицкого, о том, что сделано этим выдающимся инженером и ученым за 50 лет его беззаветного служения стохастической гидрологии и решению научных и практических проблем управления водными ресурсами.

¹ Асарин А.Е., Сотникова Л.Ф. Сергей Николаевич Крицкий – один из основных создателей стохастической гидрологии и теории управления речным стоком (к 110-й годовщине со дня рождения). Водные ресурсы. 37(6), 2010, 757–763.

Сергей Николаевич Крицкий² родился 31 (17) декабря 1900 г. в г. Самаре в семье инженера путей сообщения. В 1915 г., в связи с переводом отца на Томско-Омскую железную дорогу, он переехал в г. Томск, через два года окончил Томское реальное училище и поступил в Томский технологический институт. В 1919 г. он был мобилизован в армию Колчака и направлен юнкером в артиллерийскую школу во Владивостоке. После разгрома Колчака в 1920 г. он поступил в местный политехнический институт, а в 1923 г. переехал в Москву, где два года перебивался частными уроками и работал техником в отделе речных сооружений Москомхоза. В 1925 г. он поступил в Московский институт инженеров водного транспорта и в 1926 г. уже с дипломом инженера приступил к работе в тресте Водоканалпроект, где вместе с другим выдающимся в будущем ученым М.Ф. Менкелем проработал более 5 лет. В 1932 г. С.Н. Крицкого мобилизовали второй раз в его жизни и направили преподавать гидротехнику и гидрологию в Военно-инженерную академию РККА. Через несколько лет он уже исполнял обязанности заведующего кафедрой.

В 1937 г. С.Н. Крицкий перешел на работу в проектный отдел Главгидростроя НКВД СССР на строительстве Куйбышевской (ныне Жигулевской) ГЭС. С этого момента ведется отчет его совместной с М.Ф. Менкелем деятельности в Гидропроекте, где они проработали 24 года.

В 1961 г. С.Н. Крицкий перешел на научную работу сначала в СОПС Госплана СССР, а затем в созданный в 1968 г. Институт водных проблем Академии наук СССР.

Еще в начале 1930-х годов С.Н. Крицкий, тогда преподаватель Военно-инженерной академии, вместе с М.Ф. Менкелем предпринял попытку систематизировать и обобщить методы и инженерные приемы, использовавшиеся тогда при выполнении гидрологических и водохозяйственных расчетов.

А обобщать было особенно нечего. Из отечественных монографий того времени можно назвать «Курс общей гидрологии» А.М. Советова, «Гидрологию суши» М.А. Великанова, «Вопросы инженерной гидрологии» Д.М. Кочерина и «Гідрологію (басейнів суходолу)» А.В. Огиевского, а также публикации того же М.А. Великанова, В.Г. Глушкова, М.И. Львовича, А.Н. Маркова и Д.Л. Соколов-

² Фамилия Крицкий имеет украинско-казачье происхождение.

ского в Известиях Государственного гидрологического института, издававшихся с 1919 г. Из мало доступных тогда зарубежных работ можно назвать «Hydrology» Мида (Mead) и «Elements of Hydrology» Мейера (Meuer), выпуски трудов Американского общества гражданских инженеров и разбросанные по различным журналам статьи европейских и американских гидрологов и статистиков (Hazen, Foster, Sudler, Fuller и др.).

Первая из известных авторам публикация С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля «Расчет многолетнего регулирования стока на основе теории вероятностей» [1] датирована 1932 годом. Во введении к этой 30-страничной статье указано, что предлагаемый метод был разработан авторами при «составлении схематического проекта водоснабжения Донецкого бассейна в тресте «Водоканалстрой», т.е. при решении практических задач проектирования.

Как отмечал через почти 50 лет С.Н. Крицкий [37], эта работа знаменовала «начало применения вероятностных методов расчета многолетних колебаний речного стока и основывалась на композиции вариации величин стока, образующих маловодные и многоводные группировки различной длительности».

К вопросам методики расчетов регулирования стока С.Н. Крицкий обращался неоднократно и в дальнейшем [3,4,5,9,13,25].

Первая монография авторов – преподавателей Военно-инженерной академии РКК была задумана как первая книга труда «Инженерная гидрология» и названа «Расчеты речного стока» [2]. Уже в этой работе четко обозначен круг научных интересов С.Н. Крицкого: расчеты стока на принципе вероятности, применение различных методов исследования, максимальный сток. В заключении книги записано положение, подтвержденное дальнейшей научной деятельностью автора: «... подчинение тематики и методики всех инженерно-гидрологических работ в области речного стока запросам водохозяйственного проектирования».

Довоенные публикации С.Н. Крицкого [3–7], в основном в журнале «Гидротехническое строительство», посвящены методам расчетов регулирования стока, которые предполагалось (но не удалось) изложить во второй книге «Инженерной гидрологии», а также подходу к нормированию обеспеченности максимальных расходов воды, сохранившемуся в России (и принятому позднее в ряде других

стран) до настоящего времени. Иллюстрацией сказанного может служить приводимая ниже цитата из упомянутой книги [2].

«Процент обеспеченности определяет степень гарантии сооружений от появления расхода выше того, на который рассчитаны гидротехнические сооружения, и связанных с появлением этого расхода более или менее разрушительных последствий».

Раздел завершала таблица со шкалой расчетной обеспеченности максимальных расходов в зависимости от ответственности сооружений и масштаба последствий в случае их разрушения.

Класс сооружений	Обеспеченность для нормального расчета в %	Обеспеченность для поверочного расчета в %
I	1–2	0,01–0,1
II	1–2	–
III	2–5	–
IV	5–10	–

Можно заметить, что структура и, частично, количественные показатели этой таблицы, предложенной С.Н. Крицким в 1934 г., весьма близки к современным нормативам.

К вопросам нормирования максимальных расходов воды и практическим задачам оценки расчетного стока С.Н. Крицкий возвращался неоднократно [31, 32].

Крупнейшим итогом научной и практической деятельности С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля и созданного ими коллектива явились монографии «Гидрологические основы речной гидротехники», АН СССР, 1950 [18] и «Водохозяйственные расчеты», Гидрометиздат, 1952 [21], известные специалистам как «белая» и «черная» книги.

Первая («белая») книга объемом 34 печатных листа представляет собой практически полный курс инженерной гидрологии для строительного проектирования и состоит из двух частей: речной поток и речной сток. Первая часть, посвященная гидравлике речного потока, деформациям русла и ледовому режиму рек и водоемов, при всех достоинствах содержания и формы изложения, выходит за рамки тематики настоящей статьи. Вторая часть представлена шестью главами: подсчеты стока по гидрометрическим данным; формирование речного стока; расчеты стока по коротким рядам; расчет максимальных расходов воды половодий и паводков; методика прогнозов стока. Монография была высоко оценена инженерной и

научной общественностью и вот уже 50 лет является настольной книгой гидрологов-проектировщиков. Авторы книги были удостоены звания Лауреатов Сталинской премии.

Вторая из указанных монографий, не менее известная «черная» книга, воплотила давний замысел ученых обобщить разработанные ими и опробованные в Гидропроекте методы и приемы водохозяйственных расчетов.

Особое внимание уделено задачам и подходам к регулированию стока водохранилищами. За постановочным вступлением следуют главы, посвященные специфике расчетов регулирования стока, использующих теорию вероятностей; регулированию стока на жесткий график водоотдачи и при переменной (в зависимости от водности периода) отдаче. Здесь же формулируются задачи установления режима первоначального наполнения водохранилища. В разделе «Управление работой водохранилищ» впервые формулируются принципы построения диспетчерских графиков и практические приемы их использования. Особая глава рассматривает вопросы регулирования половодий и паводков. Завершают книгу главы «Водноэнергетические расчеты» и о работе каскадов гидроузлов и гидроэлектростанций.

Значительная часть послевоенных работ С.Н. Крицкого опубликована в шести (из восьми вышедших) выпусках сборника «Проблемы регулирования речного стока», издававшихся АН СССР в 1947–1959 гг.

Ряд работ С.Н. Крицкого, с 1937 г. работавшего в Гидропроекте, посвящены задачам определения параметров и управления работой водохранилищ, «обслуживающих гидроэлектрические станции». Это, в первую очередь, придуманные во время войны оригинальные номограммы для определения обобщенным методом энергоотдачи ГЭС в зависимости от параметров стока, полезного объема водохранилища и установленной мощности ГЭС [8]. Статьи о принципах выбора параметров ГЭС [14], об ущербах от ограничения энергоотдачи [19], нормировании обеспеченности энергоотдачи [26], об оценке экономической эффективности ГЭС [30].

Вопросам экономического обоснования обеспеченности энергоотдачи ГЭС в 1960-е годы были посвящены уникальные исследования, в которых принимали участие С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель,

М.П. Фельдман, Д.В. Коренистов, И.П. Дружинин, А.Л. Великанов и К.Н. Бестужева [41]. На их основе были даны практические рекомендации для использования в проектах.

О широте эрудиции и вкусе к решению сложных задач С.Н. Крицкого свидетельствуют статьи на темы, выходящие, казалось бы, за рамки его основных интересов. Это чрезвычайно интересное решение задачи о расплывании половодной волны при ее продвижении по руслу [25] и обзорно-аналитические рецензии на серию статей французских ученых о методах расчета энергоотдачи ГЭС [28] и на статью австралийского исследователя Морана по вероятностному расчету водохранилищ [29].

Однако большая часть научных исследований и, соответственно, публикаций С.Н. Крицкого связана с вопросами стохастической природы речного стока, методами и инструментами ее описания и анализа. Широкому кругу научных и прикладных проблем, связанных с колебаниями речного стока (годового, сезонного и максимального), посвящена большая часть публикаций С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. В числе ключевых работ следует назвать такие как [11, 12, 15, 16, 23, 35, 36].

В статье «О приемах исследования случайных колебаний речного стока» описано новое семейство кривых распределения (уже много десятилетий известное как трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого-Менкеля), разработан набор вычислительных приемов для оценки случайных ошибок выборочных параметров гидрологических характеристик и впервые обращено внимание на влияние цикличности в многолетних колебаниях речного стока на выборочные оценки.

В работе «О гидрологических основах теории регулирования стока» обобщался ряд выполненных к тому времени исследований известных зарубежных (Брукс, Джарвис, Дональдс) и российских ученых (Е.В. Оппокова, Б.Д. Зайкова, П.С. Кузина, Б.П. Мультигановского), посвященных вопросу об устойчивости среднего уровня и характера колебаний речного стока. Исходя из результатов анализа тысяча трехсотлетнего ряда колебаний уровней Нила у острова Рода, двухсотлетнего ряда уровней Сены у Парижа и столетних расходов воды Рейна и Одера, а также р. Влтавы у Праги, выполненного названными выше исследователями, С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель

пришли к важнейшим выводам. Первый из них: неизменность во времени уровня водоносности речных систем «позволяет использовать данные о колебаниях стока в прошлом в качестве гидрологической основы водохозяйственного проектирования». Второй вывод, неоднократно подвергавшийся сомнениям, на наш взгляд, необоснованным, состоял в утверждении об отсутствии в многолетних колебаниях стока правильной периодичности. В качестве единственной периодической закономерности в колебаниях стока признавали «годовой цикл, отражающий смену времен года».

Помимо указанных соображений, в статье рассматривались такие вопросы, как оценка точности определения статистических параметров гидрологических рядов сравнительно небольшой продолжительности, соотношение коэффициентов изменчивости C_v и асимметрии C_s в рядах годового стока и соответствие теоретических законов распределения эмпирическому материалу.

В работе [15] С.Н. Крицкий обращал внимание гидрологов, применяющих разные, не всегда адекватные практическим задачам, кривые распределения вероятностей: «Обилие кривых, практически почти точно совпадающих в той области, в которой соответствие их натуре поддается проверке, может дезориентировать практических работников».

Весьма примечательны и публикации 60-летней давности о методах и инструментах гидрологической науки, расцветших в мире лишь через несколько десятилетий: это статьи о применении метода наибольшего правдоподобия [17], вошедшего в мировую проектную практику последних 20 лет, и о двоякоограниченной кривой распределения [24], ставшая актуальной в 1970-е годы, когда в моду вошло распределение Джонсона.

В 1952 г. в научных кругах развернулась дискуссия о направлении развития советской гидрологии. При этом официальная наука утверждала, что единственно верными являются детерминистические или физические методы, а вероятностные – это извращения буржуазной науки. В статье, опубликованной в Известиях АН СССР в 1952 г. [22], С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель указывали, что «современные расчеты стока должны представлять собой сочетание физических методов анализа с методами математической статистики и теории вероятностей. Приемы анализа, основанные на приме-



Письмо А.Н. Колмогорова в поддержку выдвижения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля на Ленинскую премию (публикация в газете «Известия»)

нении функциональных и вероятностных закономерностей, не соперничают между собой. Каждый из них имеет свою область преимущественного применения, в которой на данном этапе развития науки не может быть заменен другим». Предложение, развивать статистические направления в гидрологии, было поддержано на страницах «Известий» академиком А.Н. Колмогоровым (рис. 1).

Одним из любимых научных детищ С.Н. Крицкого была задача вероятностного описания и расчета колебаний уровня замкнутых водоемов. Впервые этот вопрос был рассмотрен в упомянутых «Трудах первого совещания по регулированию стока», подготовленных в 1940 г. и опубликованных в 1946 г. [10].

В этой глубокой и, как всегда, логичной работе авторы первыми описали в терминах теории вероятностей механизм многолетних колебаний уровня бессточных водоемов.

Механизм колебаний уровней воды в естественных водоемах включает два элемента: а) активный фактор – причину колебаний, б) реактивный фактор, ограничивающий размах колебаний и определяющий область колебаний отметок уровня. Причиной колебаний уровней воды является изменчивость климатических и гидрологических условий (притока воды, осадков и испарения), формирующих водный баланс водоема.

Говоря об анализе возможных колебаний уровня водоема, авторы указывали, что «...изменения могут быть сведены к постоянному или временному смещению уровня тяготения. Первое (постоянное смещение уровня тяготения) является следствием как естественных изменений климата и стока, так и искусственных мероприятий в форме отделения от водоема части его поверхности или изъятия

части стока, например в случае устройства мощных оросительных систем. Второе (временное нарушение равновесия) наблюдается при одновременном изъятии значительных масс воды, например при начальном наполнении водохранилищ в первые годы после ввода их в эксплуатацию».

Предложенные в статье и развитые в [33] расчетные зависимости были использованы авторами для построения первого вероятностного прогноза уровней Каспийского моря на предстоящее столетие. На базе этих основополагающих работ был выполнен ряд интересных исследований применительно к многолетним колебаниям уровня Каспийского и Аральского морей [42,43].

Затронув эту тему, нельзя не упомянуть о не оправдавшихся прогнозах колебаний уровня Каспийского моря, дававшихся С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем в 1960-е и 1970-е годы на несколько десятилетий вперед [33, 37]. Основными причинами повышения уровня Каспийского моря, имевшими место в последние десятилетия, вопреки его прогнозировавшемуся понижению, послужили: экстремально высокий естественный сток впадающих в море рек в период с 1979 по 2000 гг. и резкое (на 25–40 км³) отставание фактического водопотребления в каспийском бассейне от прогнозировавшегося 35–40 лет назад, когда только в Заволжье предполагалось оросить 3 млн га земель.

В двух последних монографиях С.Н. Крицкого «Гидрологические основы управления речным стоком» [39] и «Гидрологические основы управления водными системами» [40] рассматриваются различные задачи вероятностного описания многолетних колебаний речного стока, излагается предложенная авторами методика совместного анализа данных наблюдений в гидрологически однородных районах и обобщаются многолетние исследования авторов по инженерной гидрологии и в области анализа и расчета колебаний уровня замкнутых водоемов.

В первой из названных книг очень хороша глава об основных типах распределений вероятностей, применяемых для описания колебаний речного стока, включающая критический анализ модных на Западе распределений Гумбеля и Джонсона, а также вопросы определения точности оценок параметров трехпараметрического гамма-распределения.

Особый интерес представляют разделы, посвященные применению метода Монте-Карло при решении гидролого-водохозяйственных задач, а также таким приемам математического описания и уточнения характеристик максимального стока, как применение усеченного гамма-распределения и совместный анализ данных наблюдений, формирующих как бы единую (для данного региона или бассейна) выборку. При использовании обобщенных выборок дисперсии оценок параметров распределения вероятностей гидрологических величин или иных характеристик стока, приведенных к единым условиям формирования, разделяются на две составляющие: случайную и географическую, и к конечному результату принимается совместная оценка.

Во второй книге рассматриваются вопросы моделирования многолетних стоковых рядов, приведения статистических параметров стока к многолетним значениям; исследуются задачи композиции функций распределения вероятностей гидрологических величин; излагаются приемы анализа и предвычисления колебаний уровня замкнутых водоемов, подобных Каспийскому и Аральскому морям. В приложениях к книге приведены расширенные таблицы ординат трехпараметрического гамма-распределения и номограммы для вычисления коэффициентов изменчивости C_v и асимметрии C_s методом приближенного наибольшего правдоподобия.

Многолетнюю плодотворную научную деятельность С.Н. Крицкий сочетал с инженерной: в период работы в Гидропроекте гидрологические и водохозяйственные разделы проектов гидроузлов Волжского каскада, Волго-Донского канала, Асуанского гидроузла, гидроузлов в Камбодже и Вьетнаме составлялись под его и М.Ф. Менкеля руководством. В годы работы в СОПСе Госплана СССР и ИВП АН СССР Сергей Николаевич в течение десятилетий был постоянным членом Государственной экспертной комиссии (ГЭК) Госплана СССР, членом ряда отечественных и зарубежных научных и научно-технических советов. Им и М.Ф. Менкелем были подготовлены два десятка кандидатов и докторов наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчет многолетнего регулирования стока на основе теории вероятностей. Труды ВИСУ, гидротехнический сборник №4, 1932. 7–32 с.

2. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчеты речного стока. Стройиздат, 1934. С. 260.

3. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Регулирование речного стока с переменной отдачей. Гидротехническое строительство, №№3, 4, 1935. 8–17 с., 13–19 с.

4. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Многолетнее регулирование стока. Гидротехническое строительство, №11, 1935.9-16 с.

5. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Обобщенный прием расчета регулирования стока на основе математической статистики. Гидротехническое строительство, №2, 1940. 19–24 с.

6. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О математическом расчете регулирования речного стока. Бюлл. по проблемам водного хозяйства АН СССР, №3–4, 1940.

7. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Об установлении коэффициента асимметрии гидрологических рядов по методу наибольшего правдоподобия. Метеорология и гидрология, №1, 1941. 12–19 с.

8. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Номограммы для водноэнергетических расчетов. Гидротехническое строительство, №5–6, 1944. 3–7 с.

9. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Математические методы расчета регулирования стока. Труды первого совещания по регулированию стока, АН СССР, 1946, 52–67 с.

10. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Некоторые положения теории колебания уровней естественных водоемов в их применении к исследованию режима Каспийского моря. Труды Первого совещания по регулированию стока. АН СССР, 1946. 76–97 с.

11. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О приемах исследования случайных колебаний речного стока. Труды Государственного гидрологического института, вып. 29, Гидрометеиздат, 1946. 3–32 с.

12. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О гидрологических основах теории регулирования стока. Проблемы регулирования речного стока, вып. 1. АН СССР, 1947. 20–56 с.

13. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О некоторых элементах режима работы водохранилищ. Проблемы регулирования речного стока, вып. 1. АН СССР, 1947. 57–87 с.

14. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О принципах выбора параметров водохозяйственных установок водохранилищ. Проблемы регулирования речного стока, вып. 2. АН СССР, 1948. 5–42 с.

15. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Выбор кривых распределения вероятностей для расчетов речного стока. Известия АН СССР, ОТН №6, 1948. 904–917 с.

16. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О соответствии теоретических кривых распределения вероятностей данным наблюдений по речному стоку. Проблемы регулирования речного стока, вып.3. АН СССР, 1948. 5–69 с.

17. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О применении метода наибольшего правдоподобия к выборочной оценке статистических параметров речного стока. Известия АН СССР, ОТН №4, 1949.

18. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. АН СССР, 1950. С. 391.

19. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Ущерб от ограничения водо- и электропотребления как фактор, определяющий целесообразные размеры водохозяйственных установок. Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. АН СССР, 1950. 5–45 с.

20. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Коренистов Д.В. Правила управления работой водохранилищ, обслуживающих гидроэлектрические станции. Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. АН СССР, 1950. 114–134 с.

21. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты. М., Гидрометеиздат, 1952. С. 392.

22. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Современное положение и пути развития советской методики расчетов речного стока. Известия АН СССР, №6, 1952. 903–919 с.

23. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Об оценке вероятной повторяемости редко наблюдаемых гидрологических явлений. Проблемы регулирования речного стока, вып. 6. АН СССР, 1956. 188–17 с.

24. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О двоякоограниченной кривой распределения вероятностей и применении ее к гидрологическим расчетам. Проблемы регулирования речного стока, вып. 6. АН СССР, 1956. 218–229 с.

25. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О распластывании волны высоких вод при продвижении по призматическому руслу. Проблемы регулирования речного стока, вып. 6. АН СССР, 1956. 248–262 с.

26. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Нормирование обеспеченности и технологии использования водной энергии. Проблемы регулирования речного стока, вып. 7. АН СССР, 1958. 7–31 с.

27. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивной связи между стоком смежных лет. Проблемы регулирования речного стока, вып. 8. АН СССР, 1959. 5–36 с.

28. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Обзор французской периодической литературы по расчетам водохранилищ, обслуживающих гидроэлектростанции. Проблемы регулирования речного стока, вып. 8. АН СССР, 1959. 258–271 с.

29. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О статье П. Морана «Вероятностная теория плотин и водохранилищ». Проблемы регулирования речного стока, вып. 8. АН СССР, 1959. 266–271 с.

30. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Об экономической оценке эффективности гидроэлектростанций. Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока. АН СССР, 1960. 99–108 с.

31. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. К уточнению норм и технических условий для расчета максимальных расходов воды при проектировании гидротехнических сооружений на реках. Труды Гидропроекта, сб. 4, 1960. 9–23 с.
32. Крицкий С.Н., Лесков Г.А. О построении расчетного гидрографа половодий. Труды Гидропроекта, сб. 4, 1960. 48–54 с.
33. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов. Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964. 29–61 с.
34. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О применении метода статистических испытаний к исследованию колебаний речного стока и к расчетам режима использующих его установок. В сб.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 2, Алма-Ата, «Наука», 1964. 82–97 с.
35. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов. Труды Гос. гидрологического института, вып. 143, 1968.
36. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Об оценке параметров распределения вероятностей по группам коррелятивно связанных гидрологических рядов. Труды ГГИ, вып. 180, 1970. 3–30 с.
37. Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. С. 157.
38. Крицкий С.Н., Коренистов Д.В. О теоретических основах использования речного стока в СССР. Водные ресурсы, №6, 1977.
39. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М., Наука, 1981. С. 255.
40. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. М., Наука, 1982. С. 271.
41. Великанов А.Д., Дружинин И.П., Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Фельдман М.П. Методика экономического выбора обеспеченной мощности гидроэлектростанций. Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока. АН СССР, 1960.
42. Асарин А.Е. Уровненный режим Аральского моря при развитии водопотребления в бассейнах рек Сыр-Дарья и Аму-Дарья. Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964. 211–221 с.
43. Раткович Д.Я. О развитии вероятностной методике прогнозирования уровня бессточных водоемов и прогнозах уровня Каспийского моря. Водные ресурсы №2, 1988. 30–40 с.

О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов¹

С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель

В этой работе рассматриваются некоторые соотношения между параметрами распределения вероятностей и вытекающие из этих соотношений приемы оценки параметров, учитывающие особенности гидрологических рядов. Вероятностному анализу гидрологических величин свойственно своеобразие, связанное со спецификой исследуемых явлений. Ряды величин речного стока, уровней озер и т.п., по которым оцениваются распределения вероятностей, относительно коротки. Члены этих рядов коррелятивно связаны между собой. Приемы исследования таких явлений разработаны слабо и почти не излагаются в руководствах по математической статистике. Совершенствование приемов анализа может способствовать успеху гидрологических исследований, хотя математически предлагаемые решения элементарны.

Работа преимущественно связана с нашей статьей «О приемах исследования случайных колебаний речного стока» [9], дополняет и в некоторых случаях уточняет ее.

Рассматриваются следующие задачи:

- применение уравнений регрессии для приводки характеристик стоковых рядов к многолетним значениям;
- коррелятивные связи между смежными членами простых цепей Маркова и их разностями;
- уточнение формул стандартных ошибок выборочной оценки параметров гамма-распределения.

Области применения выводов к гидрологическим исследованиям указываются в каждом из разделов.

О приводке гидрологических характеристик к многолетним значениям

В практике гидрологических расчетов часто возникает необходимость в приводке характеристик, вычисленных по материалам сравнительно коротких наблюдений, к многолетним значениям. Приводка основывается на синхронности колебаний стока рассматрива-

¹ Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов. Труды ГТИ, вып. 143, 1968.

емой реки с колебаниями каких-либо гидрологических или метеорологических величин, которые измерялись в течение более длительного периода. Методике приведения рядов наблюдений к одному периоду посвящен ряд работ [1, 2, 3, 4], которые оперируют преимущественно с метеорологическими характеристиками и исследуют главным образом приемы приведения их средних значений. В настоящей статье мы излагаем некоторые соображения, связанные с применением приводок к гидрологическим расчетам, цель которых – возможно более обоснованно судить о величинах расходов воды, отвечающих различным вероятностям превышения.

Задача приводки формулируется так: имеются параллельные выборки исследуемой величины y за n лет и величины-аналога x за N лет, включающих n -летний период наблюдений за y . Совместный n -летний период используется для установления связи между y и x , а полный N -летний период – для оценки многолетних значений параметров x , к которым приводятся параметры y . Требуется найти «наилучшие» оценки величин y_p , соответствующих определенным вероятностям превышения p (обеспеченностям); тип функций распределения предполагается быть известным.

Решение, к которому мы стремимся приблизиться, можно выразить так: отыскивается кривая обеспеченности $y(p)$, наиболее приближающаяся к той, которая отвечала бы всему ряду N , если бы были наблюдения y за весь этот срок. С этого наилучшего приближения к многолетней кривой снимаются величины y_p , соответствующие нормативным вероятностям превышения. За отсутствием непосредственных наблюдений кривая обеспеченности $y(p)$, приводимая к периоду N , уточняется за годы $(N-n)$ переходом от x .

Соотношения, на которые опирается решение, схематически представляются так: значения переменных y и x обуславливаются тремя группами факторов. Первая группа – общая для обеих переменных и влияет на них одновременно. Вторая группа факторов влияет только на x , а третья – только на y . Первая группа факторов порождает некоторую синхронность в колебаниях x и y и создает связь между ними, тем более тесную, чем больше удельный вес этой группы среди причин колебаний. Вторая и третья группы факторов нарушают синхронность колебаний, вызывая рассеяние зависимости y от x , и придают ей коррелятивный характер. Это определяет

применение приемов теории корреляции. Способы приводки, применяемые в современной практике, можно разделить на две группы: одна из них использует уравнения регрессии между переменными, другая – так называемое «единое решение» корреляции. Эти два подхода рассматриваются ниже.

1. Регрессии

Чтобы решить поставленную задачу – приведение гидрологических характеристик к многолетним значениям, нужно прежде всего установить наиболее удовлетворяющую ее условиям зависимость между сопоставляемыми величинами – аргументом x и функцией y . Пусть имеется n измеренных одновременных значений x_i, y_i . При нанесении на график они образуют группу точек. Рассмотрим соотношения между ними. В первую очередь определим параметры линейной зависимости вида $y=ax+b$, относительно которой сводится к минимуму сумма квадратов отклонений величины y , т.е.

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} [y_i - (ax_i + b)]^2. \quad (1)$$

Как известно, решение отыскивается приравнением нулю производной этой суммы по параметрам a и b . Вывод элементарен. Все же ввиду его принципиального значения для рассматриваемой задачи напомним необходимые преобразования. Приравнение нулю производных суммы (1) квадратов отклонений по параметрам приводит к следующим уравнениям:

производная по a

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)(-x_i) = 0,$$

отсюда

$$-\sum_{i=1}^n x_i y_i + a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = 0, \quad (2)$$

производная по b

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) = 0,$$

отсюда

$$\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i - nb = 0. \quad (3)$$

Обозначим средние значения переменных:

$$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x}; \quad \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \bar{y}.$$

Решая уравнения (1) и (2) относительно параметров a и b , получаем:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - b \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2}; \quad b = \bar{y} - a \bar{x}.$$

Коэффициент пропорциональности a приводится к виду $a=r(\sigma_y/\sigma_x)$, где

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

– выборочное значение коэффициента корреляции между переменными,

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}; \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}$$

– средние квадратические отклонения переменных от их арифметических средних.

Свободный член

$$b = \bar{y} - a \bar{x} = \bar{y} - r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \bar{x}.$$

Подстановка этих величин приводит зависимость между переменными к виду $y = ax + b = ax + \bar{y} - a \bar{x}$;

отсюда

$$y - \bar{y} = a(x - \bar{x}) = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}).$$

Равенство это есть уравнение регрессии y по \bar{x} .

Если бы мы задались целью получить зависимость, относительно которой минимальна сумма квадратов отклонений x , то пришли бы к уравнению регрессии x по y , имеющему вид:

$$x - \bar{x} = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - \bar{y}).$$

Таким образом, уравнения регрессии представляют собой линейные зависимости, относительно которых достигают минимума суммы квадратов отклонений той переменной, которая рассматривается как зависимая, коррелятивно связанная с другой, независимой переменной. Это положение относится непосредственно к группе наблюдаемых сочетаний переменных и не ограничивается какими-либо условиями относительно распределения их вероятностей. Иными словами, по отношению к наблюдаемым точкам

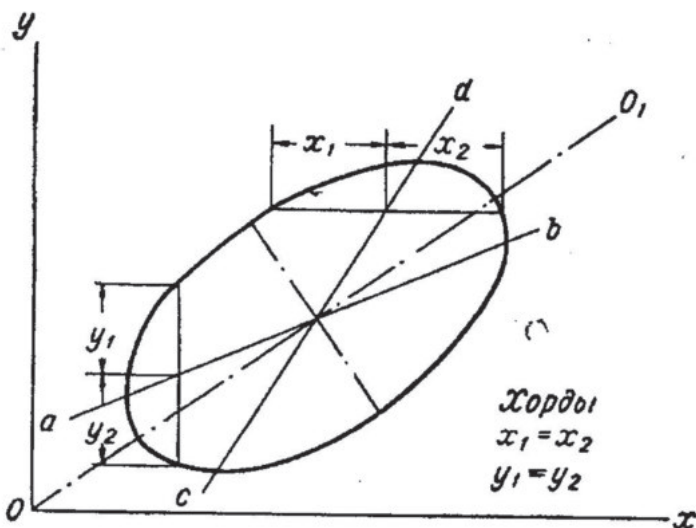


Рис. 1. Эллипс рассеивания и линии регрессии

уравнения регрессии представляют собой результаты применения способа наименьших квадратов.

Для нормального распределения вероятностей уравнения регрессии имеют более глубокий смысл. Каждая точка регрессии y по x , отвечающая определенному значению независимой переменной x , есть центр условного распределения зависимой переменной y . Величины y , появляющиеся совместно с рассматриваемым значением x , группируются вокруг этого центра, следуя также нормальному закону. Смысл линий регрессии и их «раздвоение» наглядно поясняется рис. 1.

На этом рисунке изображен эллипс рассеивания коррелятивно связанных между собой величин y и x . Прямая ab есть линия регрессии y по x . Линия ab делит пополам вертикальные хорды эллипса, выражающие рассеяние величин y при заданном x . Линия cd делит пополам горизонтальные хорды, параллельные оси x . Линии эти не совпадают. Промежуточная между ними линия OO_1 – большая ось эллипса рассеивания; она имеет угловой коэффициент σ_y/σ_x , равный отношению стандартов сопоставляемых величин.

Двойственность решения – отличие регрессии y по x от регрессии x по y – вытекает из существа задачи. Регрессия y по x дает зна-

чения $y(x)$, которые в среднем из множества случаев соответствуют принимаемым за аргумент величинам x . Если бы величины y и x были функционально связаны между собой линейной зависимостью, линия регрессии y по x (равно как и x по y) проходила бы под углом к оси x , тангенс которого равен отношению σ_y/σ_x стандартных отклонений. При неточно функциональной связи изменения переменной x лишь частично проявляются в колебаниях переменной y . Поэтому линия регрессии y по x проходит под меньшим углом к оси x , чем большая ось эллипса рассеивания, т.е. имеет угловой коэффициент меньший, чем σ_y/σ_x . Если за аргумент принимается y , те же соотношения сохраняются в перевернутом виде: зависящая от y переменная x лишь частично реагирует на отклонения аргумента. Соответственно линия регрессии x по y проходит под меньшим углом к оси y (т. е. под большим углом к оси x), чем большая ось эллипса рассеивания. Степень несовпадения колебаний, т.е. степень расхождения линий регрессии, измеряется коэффициентом корреляции между переменными.

В принципе сказанное относится не только к линейным, но и к нелинейным зависимостям. И в этом случае оценка y по x отличается от оценки x по y . Разница лишь в том, что методика построения нелинейных регрессий сложнее и менее разработана, чем линейных.

Постановка задачи о приведении расчетных характеристик стока недостаточно изученной реки к более длительному периоду наблюдений полностью соответствует соотношениям, выражаемым линиями регрессии между одновременно наблюдающимися величинами – уточняемой y и аналогом x . Принятый в гидрологических расчетах подход к решению таков (см., например, работы [4] или [5]).

По корреляции с x оцениваются параметры распределения y : среднее y_N и стандарт σ_{yN} .

Для этого составляются регрессии:

$$\bar{y}_N = \bar{y}_n + r \frac{\sigma_{yN}}{\sigma_{xN}} (\bar{x}_N - \bar{x}_n), \quad (4)$$

$$\sigma_{yN}^2 = \sigma_{yn}^2 + r^2 \frac{\sigma_{yN}^2}{\sigma_{xN}^2} (\sigma_{xN}^2 - \sigma_{xn}^2), \quad (5)$$

здесь \bar{y} , \bar{x} – средние значения соответствующих величин за периоды, обозначаемые индексами n и N ; σ_y и σ_x – оценки стандартов y и x за те же периоды; r – коэффициент корреляции между одновременными значениями y и x . Коэффициент корреляции между оценками дисперсий принят равным r^2 на основании известной в математической статистике приближенной зависимости.

Значение дисперсии σ_{yN}^2 определяется решением квадратного уравнения (5)

$$\sigma_{yN}^2 = \frac{\sigma_{yn}^2}{1 - r^2 \left(1 - \frac{\sigma_{xn}^2}{\sigma_{xN}^2} \right)}. \quad (6)$$

По параметрам y_N и σ_{yN} строится кривая обеспеченности $y(p)$; по ней определяется значение y_p .

Для приближенной оценки точности полученных многолетних параметров служат формулы стандартных ошибок:

$$\varepsilon_{\bar{y}} = \pm \frac{\sigma_{yn}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{N-n}{N} r^2}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\sigma_{\bar{y}}} = \pm \frac{\sigma_{yn}}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 - \frac{N-n}{N} r^4}. \quad (8)$$

Из этих соотношений следует, что эффект приведения быстро падает с уменьшением коэффициента корреляции, в особенности в отношении оценок стандарта. Практически приведение следует ограничивать случаями, когда коэффициент корреляции выражается величиной порядка 0,90 и выше. Что касается длительности наблюдений по короткому ряду, параметры которого приводятся, то следует считаться с тем, что исходные величины σ_y и r , на которые опирается приведение, оцениваются даже при наличии относительно длительных наблюдений со значительными случайными ошибками. Тем более недостоверна их оценка при очень коротких рядах (менее 10–15 лет). При невысоких r даже самый факт наличия коррелятивной связи становится сомнительным.

Изложенные выше приемы приводки справедливы, строго говоря, при соблюдении нескольких условий.

Первое из них – стационарность гидрологических рядов, т.е. постоянство во времени распределений их вероятностей. Допущение стационарности стокового процесса лежит в основе всей совре-

менной методики расчетов речного стока, которая сводится к переносу на будущее режимных характеристик, наблюдавшихся в прошлом. Опыт показывает, что результаты таких расчетов оправдываются с приемлемой точностью.

Второе условие – статистическая независимость колебаний годовых величин стока. Как известно, многолетним колебаниям годового стока свойственна тенденция к образованию затяжных маловодных периодов, порождающая некоторую корреляцию между смежными годовыми величинами стока. Корреляция, однако, выражена слабо, а в ряде случаев и вовсе не прослеживается.

Наконец, последнее условие, лежащее в основе наших построений, – линейность связей между одновременными значениями приводимой величины и аналога. При приведении гидрологических характеристик в подавляющем большинстве случаев нет оснований искать более сложные решения. Линейные регрессии могут связывать между собой либо непосредственно исследуемые гидрологические признаки, либо же их логарифмы. Тем самым вид выражаемых связей сильно расширяется. К тому же при тех типах распределения вероятностей, которые присущи колебаниям стока, регрессии между его одновременными величинами могли бы существенно отклониться от линейных лишь, если бы коэффициенты вариации стока сопоставляемых рек значительно отличались друг от друга. Такие соотношения не свойственны объектам приводки – гидрологически сходным бассейнам с синхронными колебаниями стока, тем более что уравнения (4), (5) применяются не к отдельным ежегодным значениям стоковых характеристик, а к оценкам параметров – среднего и дисперсии. Впрочем, в математической статистике разработаны критерии и приемы оценки нелинейности связи и степени достоверности отклонения от линейности. Изложение этих приемов не входит в задачу настоящей работы. Следует лишь предостеречь от ошибок, которые могут быть следствием попыток графически строить криволинейные зависимости по недостаточным данным. Случайные отклонения отдельных точек могут привести к недостоверным и неправильным выводам.

Таким образом, есть основания для достаточно широкого практического применения рассмотренных выше приемов.

Информация, используемая для оценки гидрологических характеристик, могла бы быть расширена путем совместного анализа колебаний стока по рекам обширных гидрологических областей, на территории которых в основном одновременно наступают маловодные и многоводные периоды. Дополнительная информация, основанная на региональных обобщениях, способствовала бы более правильной оценке соотношений, которые используются при приводках. Так, если период совместных наблюдений по сопоставляемым рекам включает лишь годы приблизительно одинаковой водности – маловодные, средние или многоводные, то оценка коэффициента корреляции между стоком таких рек преуменьшена. Имея обобщенную характеристику водности периода гидрометрических наблюдений по области, к которой относится рассматриваемый водосбор, мы могли бы в известной мере учитывать отмеченное явление. Вопросы этой категории выходят за пределы данной работы. Сведения о закономерностях колебаний стока и влияющих на него климатических явлений пока крайне ограничены и вряд ли создают возможность учитывать циклы и ритмы строго определенными математическими операциями. Соображения по этим вопросам можно найти в работе Н.В Сомова [6] и др.

2. «Единое решение»

Некоторые методы приведения гидрологических рядов используют не уравнения регрессии, а так называемое «единое решение» корреляции. Выражением его служит прямая OO_1 – большая ось эллипса рассеивания, занимающая на рис. 1 промежуточное положение между линиями регрессии. Уравнение прямой таково:

$$y - \bar{y} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}). \quad (9)$$

Это уравнение отличается от регрессий величиной углового коэффициента: σ_y/σ_x вместо $r\sigma_y/\sigma_x$. Геометрический смысл средней линии рассматривается Г.А. Алексеевым. При $r = 1$ все три прямые – уравнения регрессии y по x , регрессии x по y и средняя линия – сливаются.

При распределениях, для которых отклонения от среднего, соответствующие определенным вероятностям превышения, пропорциональны стандартам, равенство (9) связывает величины y и x , соответствующие равным повторяемостям (по терминологии Г.А. Алексее-

ва – «равнообеспеченные»). Таковы нормальные распределения, гамма-распределение при одинаковых коэффициентах вариации, кривые типа III Пирсона при одинаковых коэффициентах асимметрии. Для таких распределений вероятности превышения величин y и x , удовлетворяющих уравнению (9), одинаковы. «Единое решение» как бы перестраивает величины y и x в порядке убывания, не считаясь с тем, совпадают ли «равнообеспеченные» величины по времени их появления на объекте y и на объекте x ; равнообеспеченные величины y и x формально связываются даже в том случае, когда между ними заведомо нет физической зависимости. Если, например, расположить в убывающем порядке по росту 100 человек и значения средних годовых температур воздуха за 100 лет, то между равнообеспеченными величинами установится связь, близкая к функциональной: самому большому росту будет соответствовать самая высокая температура и т.д. Понятно, что о какой-либо зависимости между этими величинами говорить не приходится. Соответственно «единое решение», не давая никакого суждения о соотношениях между одновременными значениями y и x , принципиально непригодно для приводки характеристик стоковых рядов к многолетним значениям: приводка основывается на синхронности колебаний.

«Единое решение» корреляции вообще не имеет, насколько известно, ясного истолкования. Так, А.А. Шепелевский [2] истолковывает его как прием, раскрывающий функциональную зависимость между переменными, скрывающуюся за корреляцией, которая порождается воздействием второстепенных «рассеивающих» факторов. Такая трактовка не отчетлива. Объективного критерия для отнесения рассеивающего фактора к числу второстепенных нет. Незначительность его влияния не может быть таким критерием: разграничение основных и второстепенных факторов было бы поставлено в зависимость от субъективного выбора степени влияния, признаваемой за несущественную. К тому же при малом участии рассеивающего фактора влияние его незначительно нарушает функциональную связь между x и y , коэффициент корреляции между ними мало отклоняется от единицы, и различия между «единым решением» и регрессиями практически нет.

Если некоторый фактор участвует в формировании x и не влияет на y , то связь между этими величинами по существу не функ-

циональна. Можно говорить об условных зависимостях при постоянных значениях рассматриваемого фактора или при среднем его значении. Если «рассеивающий» фактор известен, можно пытаться исключить его влияние через частные коэффициенты корреляции и т.д. Это, однако, отнюдь не равносильно «единому решению».

Постановка задачи о раскрытии функциональной зависимости, затушеванной корреляцией, приобретает определенность, если рассматривать соотношения между некоторыми величинами x и y , связь между действительными значениями которых функциональна, но искажается ошибками измерений. Мы оперируем в этом случае с совокупностями различных величин – действительных и измеренных. Задача состоит в том, чтобы от коррелятивной зависимости, связывающей измеренные величины, перейти к функциональной зависимости, свойственной действительным физическим величинам. Именно изменением природы исследуемых величин объясняется в этом случае превращение коррелятивной зависимости в функциональную.

Однако утверждение, что «единое решение» раскрывает функциональную зависимость, искаженную корреляцией (в нашем понимании – ошибками измерений), не обосновано и в этом случае. Оно верно лишь в частном случае, когда обе связываемые величины измеряются с одинаковой точностью. Чтобы разобраться в этом, рассмотрим формирование корреляции. Для наглядности ограничимся анализом простейших соотношений, определяющих сущность задачи. Рассмотрим величины $x=z+u$ и $y=z+v$. Здесь величины $x-u=z$ и $y-v=z$ функционально связаны между собой, поскольку обе они зависят только от общего фактора z (мы принимаем простейшую зависимость – равенство). Величины u и v выражают влияние «рассеивающего фактора». В нашем толковании – это ошибки измерения величин x и y . Примем, что систематические ошибки отсутствуют, т.е. математические ожидания $\bar{X}=\bar{y}=\bar{z}$; $\bar{u}=\bar{v}=0$. Случайные ошибки характеризуются стандартами σ_u и σ_v . Под воздействием случайных ошибок зависимость между y и x становится коррелятивной. Установим ее характеристики и вид уравнений регрессии и «единого решения». Пусть \bar{z} – математическое ожидание величины z , σ_z – ее стандарт.

Тогда математические ожидания $X=\bar{y}=\bar{z}$; стандарты: $\sigma_x = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_u^2}$;
 $\sigma_y = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_v^2}$.

Ковариация при оценке по выборке из n членов равна

$$\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n} \sum (z_i - \bar{z} + u_i - \bar{u})(z_i - \bar{z} + v_i - \bar{v}) = \frac{1}{n} \sum (z_i - \bar{z})^2.$$

Математическое ожидание ковариации равно

$$\text{Cov}(xy) = \sigma_z^2$$

Коэффициент корреляции между x и y

$$r = \frac{\text{Cov}(xy)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sigma_z^2}{\sqrt{(\sigma_z^2 + \sigma_u^2)(\sigma_z^2 + \sigma_v^2)}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\sigma_u^2}{\sigma_z^2}\right)\left(1 + \frac{\sigma_v^2}{\sigma_z^2}\right)}}.$$

Единое решение:

$$y - \bar{y} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}) \sqrt{\frac{1 + \frac{\sigma_u^2}{\sigma_z^2}}{1 + \frac{\sigma_v^2}{\sigma_z^2}}} (x - \bar{x}).$$

Регрессия y по x

$$y - \bar{y} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}) = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_u^2}{\sigma_z^2}} (x - \bar{x}).$$

Регрессия x по y

$$x - \bar{x} = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - \bar{y}) = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_v^2}{\sigma_z^2}} (y - \bar{y}).$$

Из этих выражений видно, что «единое решение» совпадает с функциональной зависимостью $y=x$ между действительными, не искаженными ошибками измерений, значениями y и x лишь, если $\sigma_u = \sigma_v$, т.е. только в частном случае, когда обе сопоставляемые величины x и y измеряются с одинаковой точностью. Именно этот случай рассмотрен О.А. Дроздовым [3], который вводит в обе сопоставляемые переменные $y_i = a(\xi_i + b_j)$ и $x_i = \xi_i + b_k$ общий рассеивающий фактор

b. При этом в переменные x_i и y_i с одинаковыми индексами (т. е. одновременные) входят величины σ_i и b_k с разными индексами. Тем самым допускается, что отдельные выборочные значения рассеивающего фактора, отклоняющие переменные x_i и y_i от функциональной связи, могут быть различны для каждого из составляющих пару переменных, но в среднем рассеивание обеих переменных, характеризуемое стандартным отклонением σ , одинаково. В принятом выше понимании это означает, что ошибки каждого конкретного измерения x_i и y_i , вообще говоря, различны, но точность их измерения, характеризуемая средней квадратической ошибкой, одинакова.

Если величина x измеряется точно, а y – с ошибкой измерений, то истинную «физическую» связь дает не «единое решение», а регрессия y по x . Изменив условие и считая, что точно измеряется y , а x – с ошибками, мы получили бы противоположные соотношения.

Если отождествить, как предложено выше, «рассеивающий фактор» S с ошибками наблюдений, то совпадение функциональной зависимости с уравнением регрессии, в котором за аргумент принята точно измеряемая переменная, получает простое логическое объяснение. В этом случае отклонения точек от линии регрессии происходят только из-за погрешностей измерения величин, принимаемых за зависимые переменные. Хорды эллипса рассеивания, параллельные соответствующей оси координат, размещаются симметрично относительно линии, выражающей физическую связь (предполагая, что систематической ошибки нет, а случайные ошибки распределяются нормально). Чтобы эти условия выполнялись, регрессия и физическая зависимость должны совпадать.

Этот результат получен А.А. Шепелевским [2]. Тем не менее он приводит к выводу, что «единое решение» лучше подходит для выражения скрытой за корреляцией функциональной связи, чем уравнения регрессии. Такой вывод обосновывается тем, что соотношение между рассеивающими факторами (в принятых выше обозначениях σ_u и σ_v) неизвестно. А не зная, к какой из двух регрессий приближается правильное решение, мы «рискуем взять худшее». Произвольность такого суждения очевидна. Во всяком случае рекомендация «единого решения» относится только к отысканию скрытой функциональной зависимости, а отнюдь не к приведению

рядов наблюдений, рассматриваемому в настоящей работе. В этой последней задаче прием становится опасным, угрожает необоснованным искажением выводов и не должен применяться в тех случаях, когда связь между y и x заметно отклоняется от функциональной.

Коррелятивные связи между смежными членами простых цепей маркова и их разностями

Многие гидрологические ряды составлены из членов, колебания которых в первом приближении удовлетворительно выражаются простыми цепями Маркова. Члены таких рядов колеблются, как случайные величины, причем величина каждого последующего члена коррелятивно связана с величиной предшествующего. Таковы, например, многолетние ряды уровней или объемов Каспийского, Аральского морей и других замкнутых водоемов. Связь между членами ряда является здесь следствием того, что каждая величина представляет собой своего рода интеграл предшествующих величин, влияние которых постепенно убывает по мере их удаления в прошлое. Физическая природа таких зависимостей ясна, связь между смежными величинами, как правило, тесна. Для Каспийского моря, например, коэффициент корреляции между смежными годовыми наполнениями равен приблизительно 0,96; подобная же величина характеризует режим Аральского моря в зоне наблюдавшихся в прошлом колебаний его уровня [7, 8].

В других гидрологических рядах связь между смежными членами менее тесна, а природа ее пока не раскрыта. Это относится, в частности, к рядам годовых величин речного стока. Оценка коэффициента корреляции между его смежными величинами по рекам, располагающим относительно длительными, охватывающими несколько десятилетий, наблюдениями, в большинстве случаев приводит к значениям порядка $+0,2 \Rightarrow 0,3$. По некоторым рекам получаются коэффициенты корреляции, близкие к нулю и изредка даже отрицательные. Есть и такие реки, по которым корреляция между смежными годовыми величинами стока характеризуется за период наблюдений высокими коэффициентами, порядка $+0,5$ и выше. Как известно, оценки коэффициентов корреляции по каждой отдельной реке недостоверны из-за недостаточной длительности наблюдений. Однако тот факт, что положительные связи про-

слеживаются по подавляющему большинству рек, дает основание считать, что многолетняя инерция в ходе речного стока свойственна его режиму. К этому выводу приводит и анализ группировок многоводных и маловодных лет [11]. Подобные же связи прослеживаются в колебаниях метеорологических факторов – температуры воздуха, атмосферных осадков и т.п. Это свидетельствует, по-видимому, о том, что цикличность, подмеченная в ходе речного стока, порождается не только местными гидрологическими причинами – постепенностью расходования накопленных на водосборе запасов влаги и т.п.), но и более глубокими гео- и гелиофизическими процессами.

Несмотря на неясность происхождения, цикличность в многолетних колебаниях стока принадлежит к числу факторов, определяющих параметры и режим работы водохозяйственных установок, и соответственно требует учета в гидротехническом проектировании. В особенности это относится к водохозяйственным системам, имеющим дело с сильно колеблющимся речным стоком и высокими степенями его многолетнего регулирования.

Представление гидрологических рядов как простых цепей Маркова позволяет количественно выразить соотношения, вытекающие из тенденции к группировке маловодных и многоводных лет, и оценить влияние этой тенденции на режим водотоков и на условия использования водных ресурсов. Некоторые зависимости, характеризующие свойства простых цепей Маркова применительно к решению гидрологических и водохозяйственных задач, изложены в работе [9]. В последующем такая математическая интерпретация гидрологических рядов получила довольно широкое распространение.

При решении некоторых задач применимость приема вытекает из самого механизма исследуемого явления – именно таково положение с многолетними колебаниями наполнений (уровней и объемов воды) замкнутых водоемов. В других случаях, как, например, в исследованиях и расчетах многолетних колебаний годовых объемов речного стока, простые цепи Маркова не более чем математический прием, позволяющий в первом приближении выразить количественно и ввести в инженерный расчет наблюдающееся в природе сложное явление.

В этом разделе рассматриваются две из числа задач, связанных с использованием простых цепей Маркова в гидрологических расчетах: одна из них – оценка коэффициента корреляции между смежными членами цепи, вторая – оценка коррелятивных связей между членами цепи и их приращениями.

1. Оценка коэффициента корреляции между смежными членами простой цепи Маркова

Коррелятивная связь между смежными (а при их посредстве и между более отдаленными) членами простой цепи Маркова смещает оценки параметров их вариации. Выражения, исправляющие смещение, выведены в работе [9]. Здесь уточняется прием оценки коэффициента корреляции между смежными членами ряда, образующего простую цепь Маркова.

Рассмотрим отрезок $x_1 \dots x_i \dots x_{n+1}$ последовательности случайных величин, образующих простую цепь Маркова. Это означает, что коэффициент корреляции между членами, порядковые номера которых разнятся на n , равен ρ^n . Так, коэффициент корреляции между смежными членами $i+1$ и i (равен ρ , между членами через один – ρ^2 и т.д. Основная характеристика связи – коэффициент корреляции ρ между смежными членами последовательности. При его оценке по выборочному отрезку ряда члены его сдвигаются на один порядковый номер:

$$-x_1 \dots x_i \dots x_n, x_{n+1};$$

$$x_1, x_2 \dots x_{i+1} \dots x_{n+1}, -$$

Таким образом, число соответствующих друг другу пар x_i, x_{i+1} , по которым оценивается коэффициент корреляции, на единицу меньше числа $n+1$ членов рассматриваемого отрезка цепи и равно n .

Выборочная оценка r коэффициента ρ по общеизвестной формуле такова:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x}_1)(x_{i+1} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x}_1)^2 \sum_{i=2}^{i=n+1} (x_i - \bar{x}_2)^2}} . \quad (1)$$

Здесь

$$\bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n}; \quad \bar{x}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_{i+1}}{n} .$$

Оценка по формуле (1) смещена, т.е. математическое ожидание ее (среднее значение из множества оценок по разным случайным выборкам) систематически отклоняется от коэффициента ρ корреляции совокупности. Задача – определить смещение, чтобы исключить его и устранить систематическую ошибку. Для этого надо найти зависимость между смещенной оценкой r и искомой величиной ρ . Попытка приближенно решить эту задачу – предмет настоящей работы.

Распределение выборочных оценок коэффициентов автокорреляции (serial correlation coefficient) исследовали многие авторы [14, 15, 16]. Подавляющее большинство работ исходило из допущения, что первый и последний члены выборочного отрезка ряда равны, т.е. что $x_1 = x_{n+1}$ (допущение «циркулярности»). Такое допущение приводит к равенству между собой выборочных сумм и соответственно средних обоих сдвинутых отрезков:

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = \sum_{i=1}^{i=n} x_{i+1},$$

что упрощает анализ. Члены ряда x считались распределенными вокруг нуля, и их отклонения измерялись относительно нуля, а не относительно выборочных средних \bar{x}_1 и \bar{x}_2 . Тем самым исключалась причина смещения оценок.

Задача, попытка приближенного решения которой изложена в этом разделе, заключается как раз в том, чтобы определить смещенность математического ожидания выборочных оценок коэффициента автокорреляции. Такая задача большинством исследователей не ставилась. Лишь в работе Андерсона [14] удалось найти выражение, характеризующее смещенность оценок коэффициента корреляции для частного случая больших выборок из нормально распределенных совокупностей, члены которых статистически независимы друг от друга.

То, что исследователи, занимавшиеся временными рядами, не уделяли внимания смещенности оценок коэффициента корреляции, вытекает из существа задачи, которую они решали. Исследовалось распределение выборочных оценок коэффициента автокорреляции, в основном – дисперсия этого распределения, характеризующая рассеяние оценок. Величина рассеяния значительно превышает смещенность оценок; по-видимому, по этой причине признавалось возможным пренебрегать смещенностью.

При гидрологических исследованиях приходится рассматривать совместно оценки коэффициентов автокорреляции для многих гидрологических и метеорологических рядов. В этом случае случайные отклонения отдельных выборочных оценок взаимно уравниваются, систематическая же погрешность от смещенности приобретает большее значение. Такая постановка задачи и побудила заняться исследованием, выводы которого приведены ниже; в литературе не удалось найти работ, в которых задача рассматривалась бы в такой постановке.

Приближенное значение математического ожидания выборочной оценки коэффициента автокорреляции по формуле (1) отыскивается как частное от деления математического ожидания числителя на математическое ожидание знаменателя этой формулы. Такой прием математически не вполне корректен. Математическое ожидание функции, вообще говоря, не равно функции от математических ожиданий аргументов. Однако практически подобный подход применяется. Наиболее распространенный пример этого – поправка на смещенность оценок стандарта путем подстановки в знамена-

тель общераспространенной формулы величины $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ $n-1$ вместо числа членов выборки n . Известно, что такая поправка корректна по отношению к дисперсии – квадрату стандартного отклонения. Извлечение квадратного корня изменяет соотношения, и поправка к оценкам стандарта, строго говоря, должна была бы выражаться несколько более сложно. Тем не менее на практике применяется приведенная выше формула, дающая в большинстве случаев удовлетворительное приближение. Можно полагать, что и в рассматриваемом случае приближенный подход к определению смещенности оценок даст практически приемлемые по точности результаты. Некоторые соображения по этому поводу приводятся в конце раздела.

В соответствии с намеченным порядком исследования найдем математические ожидания числителя и знаменателя выражения (1).

Числитель дроби (1) преобразуем следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x}_1)(x_{i+1} - \bar{x}_2) = \sum_{i=1}^{i=n} x_i x_{i+1} - n \bar{x}_1 \bar{x}_2.$$

Заметим, что:

$$n\bar{x}_1\bar{x}_2 = n\bar{x}_1[\bar{x}_1 + (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)] = n\bar{x}_1^2 + \bar{x}_1\Delta x.$$

Здесь $\Delta x = x_1 - x_{n+1}$ – разность между первым и последним членами выборочного отрезка ряда.

Отсюда:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x}_1)(x_{i+1} - \bar{x}_2) = \sum_{i=1}^{i=n} x_i x_{i+1} - n\bar{x}_1^2 + \bar{x}_1\Delta x.$$

Обозначим через x_0 математическое ожидание, т.е. среднее арифметическое значение x в совокупности; σ – соответствующий стандарт. Математическое ожидание числителя дроби (1) может быть приведено к следующему выражению:

$$M \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x}_i)(x_{i+1} - \bar{x}_2) = \sigma^2(n\rho - 1) - \frac{2\sigma^2}{n} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \left(n - \frac{1-\rho^n}{1-\rho} \right) + \frac{\sigma^2(1-\rho)^n}{n}. \quad (3)$$

Последнее слагаемое правой части равенства (3) выражает математическое ожидание произведения $\Delta x \cdot x_1$ учитывающего разность между первым и последним членами выборочного отрезка ряда. Этим слагаемым, знаменатель которого равен числу n , используемых для оценки членов последовательности, можно пренебречь; коэффициент корреляции между смежными членами гидрологических рядов целесообразно оценивать по выборкам только при наличии в их составе нескольких десятков наблюдаемых членов. В пренебрежении различием между средними значениями сдвинутых рядов и заключается сущность допущения «циркулярное», принимаемого, как отмечалось, большинством исследователей.

Знаменатель выражения (1) имеет вид

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum_{i=1}^{i=n} (x_{i+1} - \bar{x}_1)^2}.$$

При достаточно больших значениях числа n членов выборочного отрезка ряда можно приближенно принять, что ожидание знаменателя равно

$$M \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2 = \sigma^2 \left[n - 1 - \frac{2}{n} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \left(n - \frac{1-\rho^n}{1-\rho} \right) \right]. \quad (4)$$

Это выражение характеризует вызванное корреляцией между смежными членами смещение оценки дисперсии по отрезку простой цепи Маркова, включающему n членов. Оно тождественно выражению (36) работы [7].

Разделяя выражение (3) числителя равенства (1) на выражение (4) знаменателя, находим приближенную зависимость между ожиданием смещенной оценки r коэффициента корреляции и его «истинным» значением в совокупности

$$r = \frac{n\rho - 1 - \frac{2}{n} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \left(n - \frac{1-\rho^n}{1-\rho} \right)}{n-1 - \frac{2}{n} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \left(n - \frac{1-\rho^n}{1-\rho} \right)}. \quad (5)$$

Это и есть искомая зависимость, характеризующая смещенность оценки r и позволяющая устранить ее систематическую погрешность. При практическом использовании выражения (5) определяем по наблюдениям по формуле (1) смещенную оценку r . Далее, решением уравнения (5) относительно ρ находим несмещенную оценку коэффициента корреляции между смежными членами последовательности. Уравнение (5) решается подбором.

Подвергнем полученное выражение некоторому анализу. Положим, что протяженность отрезка ряда, по которому оценивается коэффициент корреляции (объем n выборки), устремляется к бесконечности.

Тогда $r = \rho$, т.е. для выборок большого объема оценка коэффициента корреляции не смещена.

Исследуем теперь поведение оценки при предельных значениях коэффициента ρ корреляции совокупности.

При $\rho = 0$, т.е. при статистически независимых колебаниях каждого члена ряда,

$$r = -\frac{1}{n-1}. \quad (6)$$

Это означает, что оценка по формуле (1) коэффициента корреляции между случайно колеблющимися независимыми смежными членами последовательности имеет отрицательное смещение, равное $1/(n-1)$. Сходный результат для рассматриваемого частного случая получил Андерсон в его упоминавшейся работе [14].

При $\rho \rightarrow 1$ оценка r по формуле (1) также стремится к единице. Этот вывод следует из того, что слагаемые

$$\frac{2}{n} \cdot \frac{\rho}{1-\rho} \left(n - \frac{1-\rho^n}{1-\rho} \right),$$

входящие и в числитель, и в знаменатель дроби (5), при $\rho \rightarrow 1$ неограниченно возрастают. По сравнению с ними остальные слагаемые становятся пренебрежимо малыми. Таким образом, при функциональной линейной связи между смежными членами ряда оценка по формуле (1) коэффициента корреляции не смещена.

Чтобы количественно оценить влияние смещения на оценку коэффициента корреляции по формуле (5), приведем некоторые результаты числовых расчетов. Числа n членов ряда, по которому проводится оценка, примем равными $n=25$ и $n=50$. Длительность наблюдений в 25 интервалов времени, по-видимому, минимально необходима для того, чтобы была оправдана попытка оценивать коэффициент корреляции. Длительность рядов в 50 лет типична для относительно хорошо изученных гидрологических объектов. Результаты сопоставлений сведены в таблицу.

Коэффициент корреляции совокупности ρ	0	0,3	0,5	0,7	0,95	0,99	1,000
Смещенная оценка по формуле (1) при $n=25$	-0,04	0,25	0,44	0,62	0,84	0,87	1,000
То же при $n=50$	-0,02	0,27	0,47	0,66	0,90	0,93	1,000

Сопоставления показывают, что смещение оценки r по формуле (1) коэффициента ρ корреляции между смежными членами простой цепи Маркова заметно искажает выводы при той длительности наблюдений, которая свойственна даже хорошо изученным гидрологическим объектам. При этом обращает внимание своеобразный ход зависимости, связывающей оценку r и коэффициент ρ совокупности. Отрицательное смещение $(\rho-r)$ нарастает практически по линейному закону в интервале от 0 до 0,99 и даже выше. При дальнейшем приближении ρ к единице оценка r сближается с действительным значением. Практически, однако, со столь тесными линейными связями между гидрологическими величинами не приходится сталкиваться.

Полученные результаты интересно сопоставить с аналогичными характеристиками выборочной оценки коэффициента корреляции между случайными величинами u_i и v_i , образующими самостоятель-

ные последовательности, члены которых с одинаковыми индексами коррелятивно связаны между собой.

Известно [10], что выборочная оценка по формуле:

$$r_{uv} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (u_i - \bar{u})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (v_i - \bar{v})^2}}$$

коэффициента ρ_{uv} корреляции между случайными величинами u_i и v_i имеет смещение, выражаемое равенством:

$$Mr = \rho - \frac{1}{2n} \rho(1 - \rho^2).$$

При $\rho=0$ и $\rho=1$ смещение отсутствует.

Путем дифференцирования и приравнивания производной нулю можно установить, что максимум смещения находится при $\rho=0,56$.

В этом случае смещенная оценка равна:

$$r=0,56-0,19/n$$

Например, при $n=25$ $r=0,56-0,008$, т.е. отрицательное смещение по абсолютной величине несколько меньше 0,01.

Значительно большее смещение подобной же оценки для рядов, сдвинутых на порядковый номер, объясняется особенностями таких рядов. В самостоятельные ряды u_i и v_i входят разные, хотя и связанные между собой корреляцией величины. Сдвинутые же ряды x_i и x_{i+1} состоят из одних и тех же величин. В результате этого при исследовании корреляции между смежными членами ряда, т.е. между величинами $x_1 x_2 \dots x_i x_{i+1} \dots x_n x_{n+1}$, каждая величина (кроме крайних x_1 и x_{n+1}) входит в оба сопоставляемых ряда и участвует в формировании их выборочных средних. При перемножении отклонений, например

$$\left(x_2 - \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n}{n} \right) \times \left(x_3 - \frac{x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n + x_{n+1}}{n} \right),$$

произведения членов с одинаковыми индексами образуют квадраты x_i^2 , которых нет в соответствующих выражениях для самостоятельных рядов. Значения произведений вида $x_i x_{k+i}$ также отличаются от соответствующих произведений членов самостоятельных рядов вследствие корреляции между не непосредственно смежными членами простых цепей Маркова. Своеобразие автокорреляции нагляд-

но проявляется в том, что даже при отсутствии связи между смежными членами ($\rho=0$):

$$M \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x}) = -\tau^2 \text{ [ср. равенство (3)].}$$

Иными словами, математическое ожидание суммы произведений отклонений, сдвинутых на один номер членов ряда от выборочного среднего, равно не нулю, а дисперсии ряда со знаком минус. Эти особенности и приводят к отмеченному выше смещению выборочной оценки коэффициента корреляции между смежными членами последовательности.

Выражение (5), характеризующее смещенность оценок коэффициента автокорреляции, выведено, как указывалось, математически не строго. Тот отмеченный выше факт, что в предельном случае при $\rho=0$ выражение (5) совпадает с результатом исследований Андерсона, в известной мере подтверждает правильность оценки смещенности, в особенности при не тесной связи между величинами, т.е. при невысоких значениях коэффициента корреляции между ними.

Полностью решить вопрос о том, какова точность выражения (5) при различных соотношениях между коэффициентом ρ корреляции совокупности и объемом n наблюдений, можно путем статистических испытаний. Такие испытания должны заключаться в построении выборочных отрезков рядов, между смежными членами которых существует коррелятивная связь; при построении истинная величина коэффициента корреляции входит как исходная в расчеты и, следовательно, известна. Сравнивая результаты достаточно большого числа испытаний с выводами расчета по формуле (5), можно составить суждение о ее точности. Работа эта трудоемка; выполнение ее связывается с использованием электронных вычислительных устройств. Такое исследование выходит за рамки настоящей статьи; оно должно быть предпринято в будущем.

2. Корреляция между членами и их приращениями в последовательностях, образующих простые цепи Маркова

При исследовании колебаний гидрологических величин иногда приходится рассматривать ряды, составленные из приращений уровней, объемов воды и т.п. за последовательные годы. Так, основная характеристика режима Каспийского моря и других подобных

ему замкнутых водоемов – годовые приращения наполнений. Именно эти величины характеризуют водный баланс моря и сопоставляются с формирующими баланс климатическими и гидрологическими характеристиками – годовым стоком питающих море рек, испарением и т.д.

Представляет интерес исследовать соотношения между членами последовательностей, подобных указанным выше, и их приращениями.

Рассмотрим ряд величин x_{i-1}, x_i, x_{i+1} , образующий простую цепь Маркова, и связанный с ним ряд разностей

$$\Delta x_{i-1} = x_i - x_{i-1}; \Delta x_i = x_{i+1} - x_i.$$

Зависимости между членами этих последовательностей характеризуются тремя коэффициентами корреляции: $\rho_{xx}, \rho_{x\Delta}, \rho_{\Delta\Delta}$. Соотношения между коэффициентами корреляции выражаются следующими равенствами:

$$\rho_{xx} = 1 - (-2\rho_{\Delta\Delta}); \rho_{\Delta\Delta} = -\frac{1 - \rho_{xx}}{2}, \quad (7)$$

$$\rho_{x\Delta} = -\sqrt{\frac{1 - \rho_{xx}}{2}}; \rho_{xx} = 1 - 2\rho_{x\Delta}^2, \quad (8)$$

$$\rho_{\Delta\Delta} = -\rho_{x\Delta}^2; \rho_{x\Delta} = -\sqrt{-\rho_{\Delta\Delta}}. \quad (9)$$

Предельные соотношения таковы:

ρ_{xx}	$\rho_{\Delta\Delta}$	$\rho_{x\Delta}$
-1	-1	-1
0	-0,5	-0,71
+1	0	0

Из полученных соотношений вытекает ряд выводов. Корреляция между смежными приращениями всегда отрицательна. За положительными приращениями должны следовать преимущественно отрицательные, иначе не может осуществляться стационарный процесс. Действительно, при независимых смежных приращениях ($\rho_{\Delta\Delta}=0$) коэффициент корреляции между смежными членами последовательности, согласно уравнению (8), равен $r_{xx}=+1$, а дисперсия членов последовательности ρ_{xx}^2 , характеризующая размах их колебаний при неограниченной длительности ряда, становится бесконечно большой; это означает, что рассеивание суммы приращений неограниченно возрастает по мере удаления от любого, принимаемого за начальный члена (пропорционально квадратному корню из числа суммируемых приращений). Иными словами, процесс не стационарен.

Корреляция между величиной члена последовательности и следующим за ним приращением также отрицательна. Физический смысл этого таков: чтобы стационарный процесс мог осуществляться, необходим какой-то механизм, амортизирующий колебания, ограничивающий их размах. В колебаниях наполнений замкнутых водоемов таким механизмом служит увеличение испарения, сопровождающее рост водного зеркала с подъемом уровня.

Интересен случай равенства всех трех коэффициентов корреляции минус единице. При этом процесс вырождается в правильное чередование величины x и их приращений Δx . Пример таких последовательностей приведен в таблице.

Δx +1 -1 +1 +1 -1 и т.д.

x 0 +1 0 +1 +0 и т.д.

Для Каспийского моря, например, при некоторой схематизации его морфометрических элементов, корреляция между смежными годовыми наполнениями моря составляет, как показано в работе [9]

$$\rho_{xx} = \frac{1 - 0,5Al_*}{1 + 0,5Al_*} = 0,96, \text{ а корреляция между наполнением моря и годовым приращением наполнения } - \rho_{x\Delta} = -\sqrt{\frac{0,5Al_*}{1 + 0,5Al_*}} = -0,14.$$

Здесь $A=0,05$ – среднее для всего диапазона колебаний уровня моря отношение приращения площади водного зеркала к приращению объема моря; $l_*=0,8\text{м/год}$ – средний многолетний слой видимого испарения с зеркала моря (испарение минус осадки).

Высокий коэффициент корреляции $\rho_{xx}=0,96$ свидетельствует о большой инерции уровня режима; уровень моря в каждый данный момент определяется режимом моря за длительный предшествующий период. Коэффициент корреляции $\rho_{x\Delta}=-0,14$ несмотря на незначительную величину, выражает влияние того фактора, который ограничивает размах колебаний уровня и стабилизирует его.

Аральское море обладает сходными характеристиками: коэффициент корреляции между смежными наполнениями моря близок к 0,97, а коэффициент корреляции между годовыми приращениями наполнения около -0,12 (см. работу [8]).

Коэффициент корреляции между смежными разностями наполнений, при тесной связи между самими наполнениями, приближается к нулю.

Так, по уравнению (7) при $\rho_{xx}=0,96$, $\rho_{\Delta\Delta}=(1-0,96)/2=-0,02$.

Эта корреляция отражает увеличение испаряющей поверхности при повышении уровня водоема. При одинаковых климатических условиях большая поверхность испаряет больше воды и тем самым уменьшает приращение уровня.

Наличие для всякого стационарного процесса некоторой, хотя бы слабой, корреляции между приращениями наполнений за смежные годы не исключает возможности того, что климатические характеристики, определяющие годовой баланс водоема, колеблются по годам статистически независимо. Корреляция в этом случае устраняется при приведении приращений к постоянной площади водного зеркала.

Исследование можно распространить и на связи между разностями, не непосредственно смежными, а отделенными друг от друга некоторым числом промежуточных.

Так, в результате несложных преобразований для разностей через один интервал можно получить выражение

$$\rho_{\Delta l_* \Delta l+2} = -\rho_{xx} \frac{1-\rho_{xx}}{2},$$

для разностей через два интервала –

$$\rho_{\Delta l_* \Delta l+3} = -\rho_{xx}^2 \frac{1-\rho_{xx}}{2}$$

и вообще

$$\rho_{\Delta l_* \Delta l+k} = -\rho_{xx}^{k-1} \frac{1-\rho_{xx}}{2}. \quad (10)$$

Коэффициенты корреляции между разностями, как показывает равенство (10), при увеличении числа разделяющих их интервалов изменяются не по показательному закону. Следовательно, ряд разностей не есть простая цепь Маркова. При $\rho_{xx}=0$ все связи, более отдаленные, чем между смежными разностями, – нулевые.

Уточнение формул стандартных ошибок оценки параметров гамма-распределения

Гамма-распределение (иначе – биномиальная кривая, кривая Парсона типа III при $C_S=2C_V$), как известно, широко применяется в гидрологических расчетах. Стандартные ошибки выборочной оценки параметров этого распределения по методу моментов выражаются формулами, приближенно выведенными в работе [9]. При выводе их не была принята во внимание корреляция между выборочными

оценками \bar{x} и s , среднего x_0 и стандарта σ . Эта связь отсутствует для выборок из совокупностей, подчиняющихся нормальному гауссову распределению вероятностей. Для асимметричного же гамма-распределения такая корреляция существует и влияет на оценку параметров, связанных с \bar{x} и s , а именно – на стандартную ошибку выборочной оценки коэффициента вариации и на стандартную ошибку выборочной оценки ординат кривой обеспеченности («квантилей»).

Уточненные формулы оценок были выведены Цинь Гуан-янем и опубликованы на китайском языке в 1956 г. [12]. Сопоставление показало, что в работе [9] стандартные ошибки оценок несколько преувеличивались. Так, ошибка выборочной оценки коэффициента вариации была преувеличена для $C_v=0,5$ на 20%, причем погрешность повышается с ростом C_v ; для ординат кривой обеспеченности при вероятности превышения 0,01% оценка стандартной ошибки преувеличилась на величину порядка 5% для $C_v=0,5$ и до 15% при $C_v=1,0$.

В отечественных работах уточненные формулы применялись неоднократно: в нормах для расчета максимальных расходов воды СН-2-57 и в заменивших их технических указаниях СНИП 7-65, в докладах на Ассамблее Международной ассоциации по научной гидрологии в Хельсинки в 1960 г., в различных исследованиях и проектах. Однако специальной публикации по этому вопросу, насколько известно, на русском языке не было.

1. Стандартная ошибка выборочной оценки коэффициента вариации

Уточненное выражение стандартной ошибки ε_{C_v} оценки этого параметра по выборке из n членов таково:

$$\varepsilon_{C_v} = \frac{C_v}{\sqrt{2n}} \sqrt{1+C_v^2} \quad (1)$$

(стандартные ошибки выборочной оценки параметров для отличия от стандартного отклонения σ самой варьирующей величины условимся обозначать через ε с соответствующими индексами).

Вывод подтверждается следующими расчетами.

Коэффициент вариации

$$C_v = \frac{\sigma}{x_0} = \frac{\mu_2^{0,5}}{x_0}.$$

здесь x_0 – центр исследуемого распределения для совокупности (выборочная оценка среднего обозначается \bar{x}) σ – стандарт распределения; μ_2 – второй центральный момент (для совокупности; выборочная оценка второго центрального момента обозначается m_2).

При выборочной оценке C_v значения параметров, входящие в выражение (1), заменяются их оценками, которым присущи случайные ошибки; как известно, дисперсия выборочных оценок среднего равна:

$$\varepsilon_{\bar{x}}^2 = \frac{\mu_2}{n} = \frac{\sigma^2}{n}. \quad (2)$$

Дисперсия выборочных оценок второго центрального момента находится для гамма-распределения из следующих преобразований [9]:

$$\varepsilon_{m_2}^2 = \frac{1}{n} (\mu_4 - \mu_2^2) = \frac{1}{n} \left(3\mu_2^2 + \frac{6\mu_2^3}{x_0^2} - \mu_2^2 \right) = \frac{2}{n} \sigma^4 (1 + 3C_v^2). \quad (3)$$

Ковариация оценок среднего и второго центрального момента равна:

$$\varepsilon_{\bar{x}} \varepsilon_{m_2} \rho_{\bar{x}m_2} = \frac{\mu_3}{n},$$

здесь $\rho_{\bar{x}m_2}$ – коэффициент корреляции между выборочными оценками среднего \bar{X} и второго центрального момента m_2 .

Обозначим μ_i – центральный момент совокупности i -того порядка. Первый центральный момент $\mu_1=0$; второй центральный момент $\mu_2=\sigma^2$, как указано выше. Третий центральный момент для гамма-распределения находится из условия, что коэффициент асимметрии

равен удвоенному коэффициенту вариации, т.е. $C_S = \frac{\mu_3}{\mu_2^{1,5}} = \frac{2\mu_2^{0,15}}{x_0}$.

Отсюда:

$$\mu_3 = \frac{2\mu_2^2}{x_0}.$$

Из этих соотношений следует, что:

$$\varepsilon_{\bar{x}} \varepsilon_{\bar{x}m_2} = \frac{2}{n} C_v \sigma^3. \quad (4)$$

Дисперсия выборочных оценок коэффициента вариации связана с дисперсиями определяющих его параметров приближенным равенством:

$$\varepsilon_{C_v}^2 = \varepsilon_{\bar{x}}^2 \left(\frac{\partial C_v}{\partial x_0} \right)^2 + \varepsilon_{m_2}^2 \left(\frac{\partial C_v}{\partial \mu_2} \right)^2 + 2\rho_{\bar{x}m_2} \mu_2 \varepsilon_{\bar{x}} \frac{\partial C_v}{\partial x_0} \varepsilon_{m_2} \frac{\partial C_v}{\partial \mu_2}. \quad (5)$$

Производные C_v по параметрам равны:

$$\frac{\partial C_v}{\partial x_0} = -\frac{\sigma}{x_0^3}; \quad \frac{\partial C_v}{\partial \mu_2} = \frac{1}{2\sigma x_0}. \quad (6)$$

Подставляя выражения (2), (3), (4), (6) в уравнение (5), получаем:

$$\varepsilon^2 C_v = \frac{1}{n} \left[\frac{\sigma^4}{x_0^4} + \frac{\sigma^2}{2x_0^2} (1+3C_v^2) - \frac{2\sigma^4}{x_0^4} \right] = \frac{C_v^2}{2n} (1+C_v^2),$$

т.е. выражение (1).

Выражение (1) отличается от формулы, характеризующей стандартную ошибку выборочной оценки стандарта $\varepsilon_\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2n}} \sqrt{1+2C_v^2}$

тем, что коэффициент при C_v^2 под корнем равен единице, а не трем. Иными словами, относительная ошибка (ε_{C_v}/C_v) коэффициента вариации меньше относительной ошибки $\varepsilon_\sigma/\sigma$ стандарта. Причина уменьшения ошибки – положительная корреляция между оценками среднего и стандарта. В тех выборках, в которых среднее преувеличено по сравнению с математическим ожиданием (т.е. со средним значением исследуемой случайной величины в генеральной совокупности), как правило, преувеличена и оценка стандарта. При вычислении же коэффициента вариации оценка стандарта делится на оценку среднего; при этом ошибки обеих оценок частично взаимно уравновешиваются.

2. Стандартная ошибка выборочной оценки ординат кривой обеспеченности

Второй случай, в котором формула стандартной ошибки, выведенная в работе [9], может быть уточнена, – оценка величин, отвечающих определенным вероятностям превышения («квантилей»). В этом случае при выборочной оценке первых двух моментов – среднего и стандарта – и принятии коэффициента асимметрии равным удвоенному коэффициенту вариации уточненное выражение стандартной ошибки величины x_p , соответствующей вероятности превышения ρ , записывается в виде:

$$\varepsilon_{xp} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{1+2\left(\frac{\Phi}{2} + \Phi' C_v\right)^2 (1+2C_v^2) + 4C_v \left(\frac{\Phi}{2} + \Phi' C_v\right) - 4\Phi' C_v^2 (1+\Phi' C_v + \Phi' C_v^2)}. \quad (7)$$

Здесь $\Phi = \frac{x_p - x_0}{\sigma}$ – нормированное отклонение от среднего, определяемое по таблице Фостера–Рыбкина, $\Phi' = \frac{d\Phi}{dC_s}$ – производная Φ по C_v , приближенно определяемая по той же таблице, как отношение приращений в окрестностях $C_s = 2C_v$.

Именно это выражение было выведено Цинь Гуан-яном [12] по той же схеме, как и в нашей работе 1946 г. [9]. Эта схема излишне громоздка. Задача построения – вывести соотношения применительно к гамма-распределению с двумя самостоятельными параметрами x_0 и C_v ; между тем в математических выкладках, приведших к выражению (7), участвует параметр C_s , что осложняет вывод и приводит к сложному виду формулы.

Те же соотношения можно выразить проще, исследуя непосредственно гамма-распределение, т.е. закрепляя соотношение $C_s = 2C_v$. Вывод соответствующих выражений, предложенный Е. Г. Блохиновым, приводится ниже.

Имеем:

$$x_p = x_0 k_p \quad (8)$$

где k_p – ордината кривой распределения, соответствующая вероятности превышения ρ ; ее значение для гамма-распределения при фиксированном ρ зависит лишь от C_v .

Запишем приближенное выражение для дисперсии оценки x_p как функции оценок среднего \bar{x} и коэффициента изменчивости C_v :

$$\varepsilon_{x_p}^2 = \varepsilon_{\bar{x}}^2 \left(\frac{\partial x_p}{\partial \bar{x}} \right) + \varepsilon_{C_v}^2 \left(\frac{\partial x_p}{\partial C_v} \right) + 2\rho_{\bar{x}C_v} \frac{\partial x_p}{\partial x_0} \frac{\partial x_p}{\partial C_v}. \quad (9)$$

Для гамма-распределения оценки среднего \bar{x} и коэффициента вариации C_v коррелятивно не связаны [13].

На этом основании принимаем $\rho_{\bar{x}C_v} = 0$, тогда выражение (9) может быть записано в виде:

$$\varepsilon_{x_p}^2 = \varepsilon_{\bar{x}}^2 \left(\frac{\partial x_p}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \varepsilon_{C_v}^2 \left(\frac{\partial x_p}{\partial C_v} \right)^2, \quad (10)$$

в этом выражении:

$$\varepsilon_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma^2}{n}; \quad \varepsilon_{C_v}^2 = \frac{C_v^2(1+C_v^2)}{2n},$$

$$\frac{\partial x_p}{\partial x_0} = k_p; \quad \frac{\partial x_p}{\partial C_v} = x_0 \frac{\partial k_p}{\partial C_v}.$$

Производная $\frac{\partial k_p}{\partial C_v}$ может быть вычислена приближенно по таблице ординат кривых гамма-распределения так же, как в формуле (7).

В результате получаем следующее выражение:

$$\varepsilon_{xp} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{k_p^2 + \frac{1+C_v^2}{2} \left(\frac{\partial k_p}{\partial C_v} \right)^2}. \quad (11)$$

Переходя к относительной стандартной ошибке $\frac{\varepsilon_{x_p}}{x}$, получаем окончательно такое выражение:

$$\frac{x_p}{x_p} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{1+C_v^2}{2k_p^2} \left(\frac{\partial k_p}{\partial C_v} \right)^2}. \quad (12)$$

Для компактности выражение (12) может быть записано также в виде

$$\frac{\varepsilon_{x_p}}{x_p} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{1+C_v^2}{2} \left(\frac{\partial}{\partial C_v} \ln k_p \right)^2}. \quad (13)$$

Формула (11) представляет собой другое по форме выражение зависимости (7).

Для сопоставления значений стандартных ошибок ε_{x_p} , получаемых по выражениям (7) и (11), были проведены контрольные расчеты. Эти расчеты, как и следовало ожидать, подтвердили совпадение результатов.

Выражение (7) положено в основу номограмм «гарантийной поправки», включенных в нормы для расчета максимальных расходов воды СН-2-57 и СНиП 7-65. Этим они несколько отличаются от предшествовавшего нормативного документа – ГОСТ 3999⁴⁸, к которому были приложены номограммы, составленные до уточнения формулы стандартной ошибки.

3. Корреляция между оценками среднего и стандарта

Приведенные выше выводы показывают, что корреляция между выборочными оценками основных параметров – среднего и дисперсии – влияет на оценки зависящих от них величин. В связи с этим интересно установить характеристики коррелятивной связи между оценками среднего и стандарта. Корреляция определяется следующим расчетом.

По выражению (4) ковариация между оценками среднего и второго центрального момента равна $(2/n) \times (\sigma^4/x_0)$. Чтобы перейти от этого

выражения к ковариации между оценками среднего и стандарта, надо ввести множитель

$$\frac{d\sigma}{d\mu_2} = \frac{1}{2\sqrt{\mu_2}} = \frac{1}{2\sigma}$$

(тем самым мы приближенно выражаем стандартную ошибку ε_{m_2} оценок дисперсии через стандартную ошибку ε_s оценок стандарта).

Вводя этот множитель, получаем:

$$\text{Cov}(\bar{x}, s) = \varepsilon_{\bar{x}} \varepsilon_s \rho_{\bar{x}s} = \frac{1}{2\sigma} \cdot \frac{2\sigma^4}{n\bar{x}} = \frac{\sigma^2}{n} C_v.$$

Отсюда коэффициент корреляции:

$$\rho_{\bar{x}s} = \frac{\sigma^2 C_v}{n} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{\bar{x}} \varepsilon_s}.$$

Подставляя выражения стандартных ошибок:

$$\varepsilon_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \text{ и } \varepsilon_s = \frac{\sigma}{\sqrt{2n}} \cdot \sqrt{1+3C_v^2}.$$

Получаем:

$$\rho_{\bar{x}s} = C_v \sqrt{\frac{2}{1+3C_v^2}}. \quad (14)$$

Выражение (14) показывает, что при $C_v=0$ корреляция между оценками среднего и стандарта отсутствует. Такой вывод согласуется с тем, что в рассматриваемом предельном случае гамма-распределение переходит в нормальное. При $C_v \rightarrow \infty$ коэффициент корреляции $\rho_{\bar{x}s} \rightarrow \sqrt{\frac{2}{3}} = 0,82$. Коэффициенты вариации годовых колебаний речного стока в засушливых местностях, как известно, близки к единице. При этом коэффициент корреляции $\rho_{\bar{x}s} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{2}} = 0,71$, т.е. связь между отклонениями оценок обоих параметров вполне отчетлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов О.А. Теория приведения рядов наблюдений к одному периоду. Труды ГГО, вып. 15, 1937.
2. Шепелевский А.А. О вычислении функциональной связи, скрытой за корреляцией. Труды ГГО, вып. 15, 1937.
3. Дроздов О.А. Некоторые приемы разыскания зависимости, скрытой за корреляцией, и приведение повторяемостей метеорологических величин к одному периоду. Труды НИУ ГМС, серия I, вып. 15. Гидрометеоиздат, 1945.
4. Кривцкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. Изд. АН СССР, 1950.

5. Строительные нормы и правила, ч. VI, разд. II, гл. 7. Расчетные максимальные расходы воды при проектировании гидротехнических сооружений на реках. Нормы проектирования. Изд. лит-ры по строительству, М., 1966.

6. Сомов Н.В. Асинхронность колебаний стока крупных рек СССР. Метеорология и гидрология, №5, 1963.

7. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов. Труды Гидропроекта, сб. 42, 1964.

8. Асарин А.Е. Уровненный режим Аральского моря при развитии водопотребления в бассейнах Сыр-Дарьи и Аму-Дарьи. Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964.

9. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О приемах исследования случайных колебаний речного стока. Труды НИУ ГМС, серия IV, вып. 29. Сток и гидрологические расчеты. Гидрометеиздат, Л., 1946.

10. Смирнов Н.В. и Дунин-Барковский И.В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике. Изд. техн.-теор. лит., М., 1955,

11. Шарашкина Н.С. Исследование цикличности годовых величин речного стока применительно к задачам гидроэнергетики. Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока, вып. 9. Изд. АН СССР, 1960.

12. Цинь Гуан-ян. Теоретические ошибки гидрологических характеристик. Пекин, 4956 (на китайском яз.).

13. Бровкович Г.Н. Проверка некоторых распределений вероятностей с исключением неизвестных параметров. Сб. «Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета». Изд. МГУ, 4966.

14. Anderson R. L. Distribution of the serial correlation coefficient, *Annals of the mathematical statistics*, Vol. 13, 1942.

15. Quenouille M.H. Some results in the testing of the serial correlation coefficients, *Biometrics*, Vol XXXV, December 1948.

16. White John. Approximate moments for the serial correlation coefficient, *The Annals of mathematical Statistics*, Vol. 28, 1957.

Куделин Борис Иванович

(11.5.1910 – 26.2.1972)



Куделин Борис Иванович – выдающийся гидрогеолог; создатель учения о ресурсах подземных вод и принципов их региональной оценки; доктор геолого-минералогических наук (1955); профессор кафедры гидрогеологии геологического факультета МГУ (1957–72); заведующий кафедрой гидрогеологии МГУ (1964–72); заместитель декана геологического факультета по учебной работе (1951–952); заведующий отделом ресурсов подземных вод и проблем подземного стока в Институте водных проблем АН СССР (1968–72); научный руководитель

по гидрогеологии межфакультетской проблемной лаборатории Московского университета по исследованию взаимодействия поверхностных и подземных вод; председатель гидрогеологической секции Национального комитета СССР; научный советник Международной ассоциации гидрогеологов (МАГ); член рабочих групп Национального комитета СССР по МАГ (ЮНЕСКО), Межведомственного комитета СССР по геодезии и геофизике, Межведомственного комитета СССР по Международному гидрогеологическому десятилетию. Лауреат премий МОИП (1961), им. М.В. Ломоносова МГУ (1966), им. Ф.П. Саваренского АН СССР (1971).

В 1947 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Гидрогеологический анализ и методы определения подземного питания рек», в 1955 г. защитил докторскую диссертацию на тему «О принципах региональной оценки естественных ресурсов подземных вод»; в 1957 г. избирается профессором кафедры гидрогеологии, а в 1964 г. – её заведующим.

Участвовал в организации Института водных проблем РАН (АН СССР), в котором до 1972 г. руководил отделом ресурсов подземных вод и проблем подземного стока. Сформулировал основные направления исследования отдела, связанные с региональной оценкой ресурсов подземных вод и подземного стока территории СССР и отдельных его регионов, руководил в первые годы работами по региональной оценке субмаринного подземного стока. Опубликовал более 120 научных работ; является одним из основоположников региональной оценки и картирования естественных ресурсов подземных вод, научный руководитель первых карт подземного стока СССР масштаба 1:5 000 000 (1965) и 1:2 500 000 (1970); под его руководством были начаты работы по составлению Карты подземного стока Центральной и Восточной Европы; руководил крупными региональными работами по оценке ресурсов пресных подземных вод Прибалтики, Белоруссии, Кавказа, Урала, Сибири и Дальнего Востока, Казахстана и Средней Азии. Исследования направлены на решение кардинальных вопросов современной региональной гидрогеологии, связанных с изучением условий формирования подземного стока и закономерностей формирования подземных вод: их ресурсов, режима, баланса, химического состава и сроков возобновления, имеющих большое значение для всего цикла наук о Земле. Разработал методику определения подземного питания рек, предложил уравнение для расчёта величины стока в общем виде; разработал принципы региональной оценки ресурсов подземных вод, рассмотрел вопросы влияния различных природных факторов формирования подземного стока.

Его учениками и последователями являются В.А. Всеволожский, Р.Г. Джамалов, И.С. Зекцер, И.Ф. Фиделли, Н.А. Лебедева и др.

Р.Г. Джамалов (ИВП РАН)

Основные направления изучения подземного стока¹

Б.И. Куделин

Точное количественное определение подземного стока представляет очень большой научный и прикладной интерес для комплекса наук о Земле (и прежде всего для гидрогеологии), а также смежных с ними наук – таких как геология, геохимия, геофизика.

Подземные воды – один из важнейших источников пресной воды на Земном шаре. Они имеют ряд очевидных преимуществ перед поверхностными водами – лучшую защищенность от загрязнения, более равномерное распределение по территории. Подземные воды особенно ценны в районах аридного пояса Земли, где поверхностных вод может не быть.

Однако ресурсы подземных вод в отдельных странах и в глобальном масштабе изучены незначительно по сравнению с поверхностными водами, для которых известно общее их количество и распределение по отдельным континентам и странам. Для подземных вод человечество не располагает такими данными. Это затрудняет разработку перспективных планов использования их ресурсов, составление водных и водохозяйственных балансов, а также решение многих научных проблем. Основная причина такого положения – отсутствие методики региональной оценки и картирования ресурсов подземных вод крупных территорий. Известные в гидрогеологии гидродинамические методы расчета с успехом применяются для оценки ресурсов подземных вод отдельных объектов водоснабжения, но затруднительны для оценки ресурсов подземных вод крупных территорий из-за отсутствия в достаточном количестве необходимых расчетных параметров и из-за сложности их получения ввиду высокой стоимости разведочных и опытных работ.

Принципы и основные результаты региональной оценки и картирования подземного стока и естественных ресурсов подземных вод

В Советском Союзе за последние годы разработаны принципы региональной оценки и картирования подземного стока и естественных ресурсов подземных вод, позволившие в сравнительно короткий срок произвести их оценку для территории всей страны на площади, превышающей 20·10⁶ км².

¹ Б.И. Куделин. Основные направления изучения подземного стока. В сб. «Подземный сток и методы его исследования» (ред. Б.И. Куделин, Н.А. Огильви). М., Наука, 1972, с. 5–13

Теоретические предпосылки для решения этой проблемы вкратце сводятся к следующему. Под естественными ресурсами подземных вод понимается обеспеченный питанием расход подземного потока. Естественные ресурсы возникают и непрерывно возобновляются в процессе общего круговорота влаги на Земле. В системе эксплуатации они составляют наиболее важный элемент баланса, характеризующийся восполнением запасов подземных вод за счет их питания. Величина питания в среднемноголетнем разрезе эквивалентна подземному стоку, поэтому естественные ресурсы могут быть выражены величинами модулей, коэффициентов подземного стока и другими его количественными характеристиками. Пресные подземные воды, используемые для водоснабжения, приурочены преимущественно к верхней зоне интенсивного водообмена. Подземный сток этой зоны в районах с постоянно действующей гидрографической сетью формируется под дренирующим воздействием речных систем. Следовательно, ресурсы пресных подземных вод для гумидной зоны Земного шара могут быть охарактеризованы величиной подземного стока в реки, определяемой на основе генетического расчленения гидрографа (гидрограммы) общего стока рек и путем выделения на нем той части, которая формируется за счет дренирования водоносных горизонтов и комплексов.

На основе проведенных обширных исследований в СССР разработан комплексный гидролого-гидрогеологический метод генетического расчленения гидрографа реки, учитывающий гидрогеологические условия речных бассейнов и режим подземного стока в годовом гидрологическом цикле из всех водоносных горизонтов, дренируемых речной системой. По имеющимся данным, на территории СССР можно выделить следующие основные типы режима подземного стока в реки.

- Преимущественно нисходящий тип режима подземного стока, характерный для горных стран (в половодье и паводки подземный сток увеличивается).
- Преимущественно подпорный тип режима подземного стока, характерный для равнинных территорий (в половодье и паводки подземный сток уменьшается).
- Смешанный тип режима подземного стока, когда верховья рек располагаются в горах, низовья – на равнинах.

В различных физико-географических условиях регионов указанные три основных типа режима подземного стока в реки, определяемые степенью гидравлической связи водоносных горизонтов с рекой, подразделяются на виды с учетом влияния: а) озерного или искусственного регулирования; б) болотного регулирования; в) наледного регулирования в районах развития криолитозоны (так называемый мерзлотный тип подземного питания рек).

В зависимости от гидрогеологических и физико-географических условий выбирается та или иная схема расчленения гидрографа (гидрограммы) реки.

Метод расчленения гидрографа реки и определения подземного стока позволяют получить среднегодовую величину естественных ресурсов подземных вод, формирующихся в бассейне реки. Это – метод региональной оценки естественных ресурсов подземных вод.

Под региональной оценкой естественных ресурсов подземных вод понимается определение естественных ресурсов для значительных территорий, например: в пределах бассейна грунтовых или артезианских вод или достаточно крупных их частей, в пределах отдельных стран и целых континентов. При такой оценке преследуется цель получения средней или суммарной характеристики ресурсов для бассейна грунтовых или артезианских вод или достаточно крупных частей территории, а не для отдельного небольшого участка водоносного горизонта или комплекса, что достигается при детальных исследованиях.

Для региональной оценки естественных ресурсов подземных вод используются гидрометрические данные по расходам рек, и специальных дорогостоящих разведочных и опытных гидрогеологических работ проводить не требуется.

Во многих случаях гидрометрические станции (посты) располагают длинным рядом наблюдений расходов рек, что позволяет получить среднемноголетние величины подземного стока и естественных ресурсов подземных вод, повышающие их точность и надежность, а также исследовать многолетнюю изменчивость подземного стока.

По данным, рассчитанным по отдельным речным бассейнам, составляется комплекс карт подземного стока по заданной территории: 1) карта среднемноголетних модулей подземного стока

(в л/км²-сек), характеризующая распределение по территории абсолютных величин расхода подземного стока, 2) карта среднемноголетнего слоя подземного стока (в мм/год), которая показывает величину инфильтрационного питания подземных вод; 3) карта подземного стока (в % от общего речного стока), позволяющая оценить роль ресурсов подземных вод в общих водных ресурсах той или иной территории; 4) карта коэффициентов подземного стока, показывающая, какая часть атмосферных осадков расходуется на питание подземных вод (последняя карта дает важнейшую характеристику водного баланса).

Указанный комплекс карт представляет большой интерес для науки и практики и позволяет определять величины (объем) подземного стока при составлении общего водного баланса территории; определять естественные ресурсы подземных вод для заданного района; определять величины питания (восполнения) подземных вод при региональной оценке эксплуатационных ресурсов; решать вопросы охраны подземных вод от истощения; исследовать взаимосвязи поверхностных и подземных вод; решать проблемы прогноза изменения величины общего речного стока под влиянием интенсивного отбора подземных вод для нужд народного хозяйства; развивать более совершенные методы расчета и прогноза речного стока; регионально изучать режим и баланс и закономерности формирования подземных вод.

Можно поставить и более узкую задачу – оценить минимальные естественные ресурсы подземных вод по межгодовым или зимним расходам рек, которые будут характеризовать ресурсы (подземный сток) высокой степени обеспеченности, а не их среднегодовые величины. Преимущественно используется более простая методика, однако информации будет меньше. При этом методе нельзя дать точную количественную оценку роли подземного стока в речном и в общем водном балансе территории, а также получить данные о коэффициенте подземного стока, который по существу характеризует инфильтрационное число.

Для оценки естественных ресурсов подземных вод аридных и полуаридных районов, где, речной сети нет или она слабо дренирует водоносные горизонты, на территории СССР проводились гидродинамические расчеты расхода подземного потока, а также водно-

балансовые исследования. Глубокий подземный сток по ряду структур определялся при помощи решения уравнения среднего многолетнего водного баланса, составленного для областей питания артезианских бассейнов с последующим гидродинамическим анализом результатов.

Если учесть, что территория СССР находится в самых разнообразных природно-ландшафтных, структурно-геологических и гидрогеологических условиях, то это позволяет надеяться на возможность применения разработанной теории и накопленного опыта в других странах и построить аналогичные обзорные мелкомасштабные карты подземного стока отдельных континентов, а затем и всей планеты. Масштаб обзорных карт континентов может быть 1:1,5·10⁶, 1:2,5·10⁶, 1:4·10⁶ и более мелкий, как это уже практикуется для обзорных геологических и тектонических международных карт.

При помощи карт подземного стока можно устанавливать наиболее общие закономерности формирования естественных ресурсов подземных вод. Эти закономерности в общих чертах сводятся к следующему.

Вполне четко выделяются три основных фактора, влияющих на формирование подземного стока: климат, рельеф и структурно-гидрогеологические условия. Все они действуют не изолированно, а взаимосвязанно. Это маскирует влияние одного какого-либо фактора, взятого в отдельности, и затрудняет выяснение его действительной роли в процессе формирования подземного стока.

Величина подземного стока представляет собой, таким образом, некоторую обобщенную (интегральную) количественную характеристику весьма сложного природного явления, заключающегося в процессах питания, движения и дренирования подземных вод.

Влияние климата придает подземному стоку черты ярко выраженной широтной зональности. Так, величины модулей подземного стока в пределах Европейской части СССР закономерно уменьшаются с северо-запада на юго-восток от 7–4 л/сек·км² в районах Прибалтики до долей литра в степях южных районов России и Украины. Количество атмосферных осадков изменяется в том же направлении от 700–600 до 400–300 мм/год, в то время как испарение увеличивается.

Широтная географическая зональность подземного стока наблюдается на территории Западной Сибири, где с севера на юг под влия-

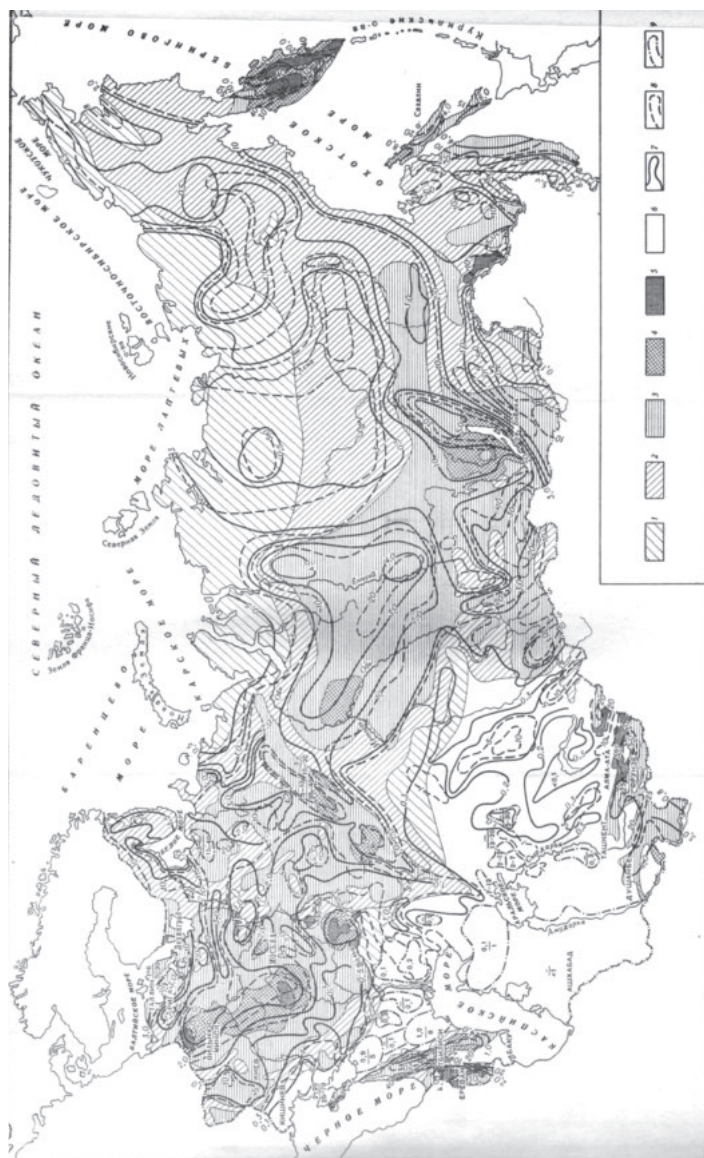
янием тех же причин уменьшаются модули от 3,0–2,5 в районах Обской губы и Енисейского залива до 0,5–0,3 в Северном Казахстане, Барабинской и Кулундинской степях.

В пределах горных сооружений Европейской части СССР, в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке и в Средней Азии наблюдается вертикальная зональность подземного стока, связанная с вертикальной поясностью распределения атмосферных осадков, возрастающих с высотой местности (до известных пределов). Увеличение модулей подземного стока с высотой наблюдается в пределах горных сооружений Кавказа, Урала, Тянь-Шаня и др. В меньшей степени это характерно для платформ, где на возвышенностях, которые, как правило, служат областями питания крупных артезианских бассейнов, по тем же причинам увеличиваются модули подземного стока (Валдайская, Средне-Русская, Приволжская и другие возвышенности).

К депрессиям рельефа модули подземного стока снижаются. На территории Европейской части СССР минимумы стока связаны с Ильменской, Мещерской и другими низменностями. Однако это положение справедливо лишь для платформенных условий. В межгорных впадинах, наоборот, как правило, мощность зоны пресных вод увеличивается, и эти области имеют значительные ресурсы пресных подземных вод (Рионская и Куро-Драксинская впадины на Кавказе, Ферганская в Средней Азии и т.д.). Это связано с тем, что области питания подземных вод межгорных впадин значительно расширяются за счет прилегающих горных сооружений.

На фоне общей закономерной горизонтальной и вертикальной географической зональности подземного стока, которая связана с климатической зональностью и влиянием структуры земной коры, отмечается влияние на условия формирования стока гидрогеологического фактора, нарушающего общий плавный ход изолиний.

Резче всего заметно влияние местных гидрогеологических условий на формирование подземного стока в районах развития карста, грубообломочного материала конусов выноса, аллювиальных и флювиогляциальных отложений древних переуглубленных речных долин, где наблюдается резкое увеличение модулей подземного стока и ресурсов подземных вод по сравнению с фоновыми их значениями. В районах развития карста можно встретить и практически безводные участки, например: на Крымской Яйле, на Силурий-



Схематическая карта подземного стока СССР (Составлена И.С. Зекцером, Б.И. Куделиным при участии Л.П. Новоселовой на основе карт подземного стока СССР в масштабе 1:5 000 000, изд. 1965 г.)
 1-6 - величина подземного стока, % от общего речного стока; 1 - 10; 2 - 10-30; 3 - 30-40; 4 - 40-50; 5 - >50; 6 - величина подземного стока, в % от общего речного стока не рассчитывалась; 7 - изолинии среднегогодового модуля подземного стока, л/сек; 8 - изолинии среднегогодовых коэффициентов подземного стока, % от осадков; 9 - участки сложных условий формирования подземного стока, в которых указаны пределы колебаний или средние значения; числитель - модуль подземного стока, знаменатель - коэффициенты подземного стока

ском плато (побережье Финского залива) и в других местах. Однако это явление носит узлокальный характер. Оно связано с поглощением атмосферных осадков и поверхностного стока карстовыми пустотами и приводит лишь к перераспределению подземного стока в пределах сравнительно небольших площадей.

Значение гидрогеологического фактора в формировании подземного стока нельзя рассматривать в отрыве от комплекса других физико-географических факторов. В северо-восточной части СССР особенно большое влияние на условия формирования подземного стока оказывает региональное распределение многолетнемерзлых пород. Карты подземного стока позволяют обнаружить общие тенденции влияния многолетней мерзлоты на пространственные особенности распределения подземного стока на территории СССР, заключающиеся в снижении его модулей в областях, где мерзлота достигает большой мощности и имеет сплошное развитие. Наиболее четко влияние многолетней мерзлоты на формирование подземного стока проявляется в том, что в поясе сплошного ее распространения он составляет обычно меньше 10% от общего речного стока, тогда как в большинстве других районов колеблется от 20 до 40% и более (см. карту).

Своеобразная черта формирования подземного стока на северо-востоке страны в области широкого распространения многолетнемерзлых пород и сурового климата – наледное регулирование, приводящее к сезонному перераспределению подземного стока в реки. Общий объем аккумулированной в наледях воды достигает в зимнее время свыше 30 км³.

Весьма своеобразны условия формирования подземного стока в аридных и полуаридных районах.

При помощи карт подземного стока были подсчитаны естественные ресурсы пресных подземных вод на территории, превышающей 20·10⁶ км². Они составили величину, превышающую 30 000 м³/сек, что составляет 24% от общего речного стока. Эта цифра несколько занижена, если иметь в виду, что по части территории для такой оценки материалов нет, и не были учтены некоторые глубокие водоносные горизонты пресных вод.

Естественные ресурсы подземных вод подсчитаны по отдельным естественноисторическим районам, и, пользуясь картами, их можно определить для любой заданной площади.

Помимо естественных ресурсов подземных вод, в земной коре в процессе ее исторического развития накоплены огромные геологические запасы пресных и особенно соленых подземных вод. Эти воды, принимающие относительно слабое участие в общем круговороте влаги на Земле, не учтены или учтены не полностью в водном балансе планеты. Однако в определенных структурно-гидрогеологических и климатических условиях (аридный пояс Земли) их сработка без полного восстановления за счет атмосферного питания (например, линзы пресных вод в пустынях) может в ряде случаев явиться существенным, хотя и временным дополнительным источником водных ресурсов.

Научные аспекты исследований в области подземного стока

Следует отметить, что исследования подземного стока и картирование естественных ресурсов подземных вод необходимы не только при решении разнообразных практических задач. Построенные карты подземного стока найдут широкое применение и для решения научных вопросов – при изучении региональных закономерностей формирования подземных вод, их ресурсов и химического состава в зависимости от интенсивности подземного стока, климатических, гидрологических и геологических факторов.

Существенный недостаток современных теоретических работ по формированию подземных вод состоит, в частности, в том, что в подавляющем их большинстве предпринимаются попытки вскрыть закономерности формирования химического состава подземных вод в связи лишь с вещественным составом водовмещающих пород, исключая из анализа количество растворителя, циркулирующего в породах. В лучшем случае даются только качественные оценки интенсивности подземного стока по вертикальным зонам, причем понятия о зонах интенсивного, замедленного и весьма замедленного водообмена нередко носят отвлеченный характер. В такие понятия не вкладывается конкретное содержание о скорости движения воды в породах, о темпах водообмена и о количествах воды, участвующих в геохимических процессах в земной коре. Это – одна из причин наблюдающихся еще резких противоречий во взглядах на происхождение подземных вод в глубоких частях литосферы, закономерностях формирования их химического состава и концентрации растворов.

Перенос и вынос химических элементов с подземным стоком представляют один из наиболее грандиозных процессов их миграции в земной коре. Этот процесс уже давно привлекает внимание исследователей, однако количественная оценка его тормозилась из-за отсутствия данных по подземному стоку. По этим данным можно глубже разработать вопросы, объясняющие роль подземного стока в гипергенных процессах, в формировании и разрушении месторождений полезных ископаемых, в том числе рудных, нефти и газа, в формировании геотермического режима земной коры, в усовершенствовании гидрохимических методов поисков полезных ископаемых по химическому выносу в реки с подземным стоком и др.

Большое значение в гидрологии имеет количественная оценка подземного стока. Успешное решение практических задач по комплексному использованию и охране водных ресурсов страны в значительной мере обеспечивается возможностью точного выражения через величину подземного стока в реки количественных характеристик взаимосвязи речных и подземных вод.

Решение проблемы подземного стока открывает широкие возможности более глубокого анализа условий формирования речного стока с учетом основных особенностей подземного стекания воды в речных бассейнах. Это в то же время позволяет дать обоснованную оценку возможных изменений речного стока в результате воздействия человека на природу и помогает решить вечно актуальную проблему влияния леса на сток в различных физико-географических условиях, так как именно круговорот воды в природе, связанный с подземным стоком, – решающий фактор в этих вопросах.

Гидрогеологическая наука за последние годы вплотную подошла к количественному выражению грандиозных процессов подземного стока. Общий круговорот влаги на Земле представляет единство всех ветвей круговорота – в атмосфере, гидросфере и литосфере. Это поднимает на новую, более высокую ступень изучение общего водного баланса и других вопросов науки о Земле.

Задачи дальнейших исследований. В области изучения подземного стока и связанных с ним проблем на первый план выступают очередные наиболее актуальные задачи:

- Исследование континентальных и глобальных закономерностей формирования подземного стока и его количественная оценка.

- Изучение закономерностей формирования и количественная оценка глубокого подземного стока всех типов вод: пресных, соленых, рассолов. Для этого потребуются усовершенствование и разработка теории глубокого стока и всех видов движения воды в глубоких слоях Земли.
- Исследование подземного стока в Мировой океан, моря, внутриконтинентальные водоемы и бессточные впадины. Отсутствие этих данных не позволяет замкнуть водный баланс нашей планеты.
- Разработка теоретических и региональных проблем по выяснению роли подземного стока в процессах теплопереноса в земной коре, химической денудации и аккумуляции.
- Оценка геологических запасов подземных вод.
- Определение сроков водообновления и на этой основе среднего абсолютного возраста подземных вод по данным о подземном стоке, геологических запасах и действительных скоростях движения подземных вод.
- Решение общей проблемы о закономерностях формирования подземных и поверхностных вод, их количества и качества с привлечением данных о подземном стоке.

Кунин Владимир Николаевич

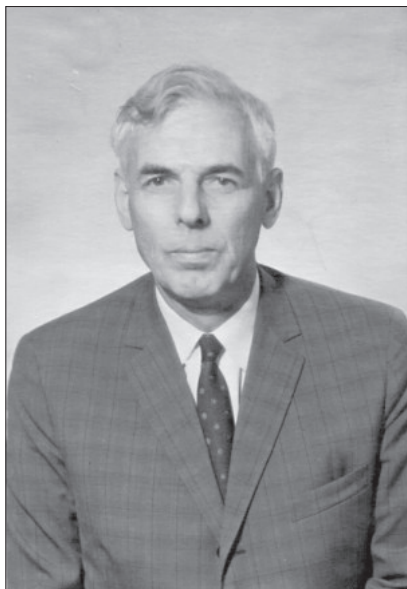
(15.8.1906 – 22.10.1976)

Владимир Николаевич Кунин – крупнейший учёный, специалист в области изучения закономерностей взаимодействия подземных и поверхностных вод; геоморфологии, изучения и освоения местных водных ресурсов пустынь, гидрогеологии и палеогеографии аридной зоны; доктор географических наук, профессор, член-корреспондент Академии наук СССР, директор Института водных проблем АН СССР в 1968–76 гг.

В.Н. Кунин родился 15 августа 1906 г. в г. Женеве (Швейцария).

В 1930 г. окончил географический факультет Ленинградского государственного университета. Ещё студентом, начиная с 1928 г., принимал деятельное участие в изучении пустынь как научный сотрудник Пустынной станции Репетек и Каракумской экспедиции АН СССР.

В 1935 г. окончил аспирантуру Государственного гидрологического института в Ленинграде и целиком посвятил себя исследованиям засушливых территорий Азии. Старший специалист Гидрометеослужбы Туркмении, инженер-гидрогеолог Ашхабадской геологической партии, консультант Туркменского геологического управления, заведующий отделом Туркменского филиала АН СССР, научный руководитель Карабогазской экспедиции АН Туркменской ССР, работа в пустынях Ирана и Центральной Азии – вот далеко не полный перечень деятельности В.Н. Кунина, направленной на изучение местных водных ресурсов пустынь. Этими же вопросами Владимир Николаевич занимался и в Институте географии АН СССР, которому он отдал более 30 лет своей жизни (с 1937 г.).



Личное участие в экспедициях, непосредственное руководство комплексными физико-географическими и гидрогеологическими исследованиями, проводимыми в Туркмении, Средней и Восточной Азии, позволили Владимиру Николаевичу собрать обширный научный материал, который лёг в основу его кандидатской диссертации «Современные эоловые формы Юго-Восточных Каракумов» (1937 г.), а затем и докторской – «Подземные воды Каракумов» (1945 г.). Большое научное и практическое значение этой работы получило высокую оценку Правительства Туркменской ССР, которое присвоило В.Н. Кунину почётное звание «Заслуженный деятель науки Туркменской ССР». В 1951 г. В.Н. Кунин был избран членом-корреспондентом АН Туркменской ССР.

С марта 1968 г. Владимир Николаевич начал работать в Институте водных проблем АН СССР в должности заместителя директора. Следует отметить, что В.Н. Кунин, вместе со своими коллегами и единомышленниками, ведущими учёными страны – А.Н. Вознесенским, Г.П. Калининим, Б.И. Куделиным, был одним из организаторов Института, а в 1973 г. стал его директором.

В.Н. Кунин – классический географ широкого профиля. Круг его научных интересов охватывал геоморфологию и палеогеографию аридной зоны; геологию и гидрогеологию засушливых районов; тепловой и водный режимы, растительность и почвы пустынь; происхождение и закономерности распределения подземных и поверхностных вод; влияние поверхностного стока и атмосферных осадков на режим подземных вод; искусственное формирование линз пресных вод, научные принципы их эксплуатации; методики расчёта, прогноза и регулирования подземного и поверхностного стока в пустыне и т. д.

В.Н. Кунин был одним из ведущих учёных в области гидрогеологии аридной зоны, занимался изучением закономерностей формирования, оценкой и освоением водных ресурсов пустынь, изучением происхождения и перспектив использования линз пресных подземных вод. Он по праву считается одним из основоположников учения о подземных водах пустынь. Результаты многолетних исследований В.Н. Кунина представлены в его многочисленных научных статьях и обобщены в монографиях «Очерки природы Каракумов», «Местные воды пустынь и вопросы их использования», «Временный поверх-

ностный сток и искусственное формирование грунтовых вод в пустыне», «Линзы пресных вод пустынь». Несмотря на то что со времени публикации этих монографий прошло почти полвека, они не потеряли свою актуальность и широко используются в научной и практической деятельности гидрогеологами и гидрологами, занимающимися изучением перспектив использования водных ресурсов пустынь.

Владимир Николаевич всегда блестяще сочетал теорию с практикой, фундаментальные научные исследования – с прикладными проблемами, решения которых безотлагательно требовало водное хозяйство.

Освоение водно-земельных ресурсов Каракумов и Прибалхашья, Копетдага, трасс Главного Туркменского и Каракумского каналов, Красноводска и залива Кара-Богаз-Гол было бы невозможно без гидрогеологических исследований, проводимых в этих районах под руководством и при непосредственном участии В.Н. Кунина. Результаты этих исследований позволили снабдить водой промышленные и скотоводческие районы, оросить высохшую землю, наладить освоение минеральных ресурсов.

Эти работы легли в основу развёрнутой программы преобразования пустынь, для осуществления которой по инициативе В.Н. Кунина в Туркмении был создан Институт пустынь, ставший в то время Всесоюзным центром по изучению засушливых территорий.

В своей деятельности Владимир Николаевич уделял большое внимание защите водных ресурсов от загрязнения и истощения и постоянно искал пути рационального решения проблемы их охраны. Он отстаивал мнение, что одним из основных путей защиты водоёма от загрязнения является комплексное безотходное производство; доказывал необходимость создания единой системы борьбы с загрязнением природных вод и разработки автоматических систем контроля и управления их качеством.

По инициативе Владимира Николаевича была организована координация исследований Каспийского моря с целью разработки научных основ управления режимом Каспия в условиях комплексного использования водных ресурсов его бассейна.

Обширной и многогранной была международная деятельность Владимира Николаевича. Он много внимания уделял развитию

международных научных связей; поддерживал контакты с крупнейшими учёными мира; был вице-президентом Международной ассоциации гидрологических наук; читал лекции в Австралии, Великобритании, Аргентине, Болгарии, Германии, Дании, Индии, Иране, Китае, Ливии, Норвегии, Польше, США, Тунисе, Турции, Франции, Чехословакии, Чили, Швейцарии, Швеции.

В 1960-е гг. В.Н. Кунин был официальным представителем СССР в «Научной программе ЮНЕСКО по изучению аридной зоны», членом Бюро Научного Комитета по проблемам окружающей среды Международного совета научных союзов.

Работая в начале 1970-х гг. старшим научным советником Секретариата Организации Объединенных Наций, Владимир Николаевич Кунин приложил много сил для укрепления международного сотрудничества в области охраны окружающей среды.

В.Н. Кунин всегда плодотворно сочетал научную деятельность с большой научно-организационной и педагогической работой; он подготовил большую школу ученых – гидрогеологов и географов.

В.Н. Кунин был главным редактором журнала «Водные ресурсы», редактором многих изданий, касающихся различных аспектов изучения и использования водных ресурсов, часто выступал в печати по актуальным проблемам современности, был членом бюро Отделения океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР.

Владимир Николаевичем был беззаветно предан науке. За несколько дней до кончины он говорил о научных проблемах и планах развития Института – это были слова учёного, устремлённые в будущее, человека, который, уходя из жизни, думает и беспокоится о развитии науки и судьбах своих коллег и учеников. Владимир Николаевич прекрасно разбирался в литературе, музыке, живописи, архитектуре. Он был блестящим учёным и замечательным человеком.

И.С. Зекцер (ИВП РАН)

Подземные воды и охрана окружающей среды¹

В.Н. Кунин

Когда автор делал свои первые попытки самостоятельных научных исследований, на него неизгладимое впечатление произвела научно-популярная книга выдающегося английского астронома Дж. Джинса (1877–1946) и особенно следующие ее строки, написанные около полувека назад:

«Уже давно на звезды перестали смотреть как на простые светящиеся точки; мы видим теперь в каждой из них как бы эксперимент в титаническом масштабе, как бы тигель для высоких температур; сама природа орудует в нем при температурах и давлениях, оставляющих далеко за собой все те, которыми мы располагаем в лабораториях, и дает нам возможность наблюдать результат; при этом мы можем встретиться с такими свойствами материи, которые ускользают от физика на Земле, ввиду незначительности шкалы физических состояний, которыми он может располагать. Так, например, в туманностях материя может существовать при плотностях, по крайней мере, в миллион раз меньших, чем все доступные нам на Земле; в некоторых звездах она, напротив, в миллион раз плотнее. Как же можем мы надеяться постичь все свойства из лабораторных опытов, в которых нам может быть дана только одна часть на миллион миллионов частей шкалы плотностей, имеющихся в природе?»².

Больше всего, признаюсь, я был тогда поражен идеей Джинса, теперь, может быть, и кажущейся тривиальной, о том, что для понимания процессов, происходящих внутри нашей планеты, необходимо изучать далекие миры. Нет, моя профессия далека от астрономии, и мои знания в этой области не выходят за пределы статей для «смежников», публикуемых в этом журнале.

Однако я понимаю, сколь поразительны открытия, сделанные астрономами за истекшие десятилетия. Теперь остается ждать, когда же эти открытия будут использованы для объяснения структуры и процессов, происходящих внутри Земли. Кто нам скажет об этом: астрофизики, физики, физико-химики или, наконец, геологи-текто-

¹ Кунин В.Н. Подземные воды и окружающая среда // в сб. Воды пустыни и окружающая среда «Природа», 1976, №3 С.70–76.

² 'Джине Джемс. Вселенная вокруг нас М. – Л., Гостехиздат, 1932

нисты и «земные» геофизики? Кто нам откроет глаза? Или вообще нет оснований ждать ответа на эти вопросы? Может быть, наша Земля – уникал, и свойства, устанавливаемые для других миров, «не подходят» для нашей планеты?

Я понимаю: все это вопросы дилетанта, и поэтому они, может быть, неуместны. Но я должен пояснить, почему это важно тем, кто изучает природные воды в практических целях.

Конечно, любые тектонические нарушения очень важны для определения путей миграции подземных вод. Особенно важны разрывные нарушения и среди них зоны, где пересекаются разрывные нарушения различных простираний. Именно они являются проводниками для воды, иногда (но, конечно, далеко не всегда) – на большие расстояния и кое-где со значительными скоростями.

Особенно резко это проявляется там, где мало атмосферных осадков, где, если нет пресных подземных вод, близко связанных с пресными водами рек, надо искать в первую очередь разрывные нарушения и их пересечения. Так обстоит дело и в Копетдаге, и в прилегающих районах Ирана, и в коренном цоколе Кызылкумов, выходящем к поверхности, и во многих других районах, конечно, не только засушливых. Просто в них эти обстоятельства проявляются более резко и они имеют большее практическое значение.

Вот почему все это особенно важно специалисту, занимающемуся самой верхней пленкой гидросферы суши – пресными и слабоминерализованными водами, т.е. теми водами, без которых не может существовать человек и подавляющее большинство других живых организмов на Земле.

У гидрогеологов, по крайней мере, советских, сложилась довольно стройная концепция трехзонального расчленения: зона активного водообмена, близко связанная с атмосферными осадками и реками; зона затрудненного водообмена и, наконец, зона застойных вод, куда процессы круговорота воды (т.е. гидрологического цикла) проникают лишь теоретически, а практически вода считается застойной, нередко сингенетичной, т.е. сохраняющейся там примерно с тех времен, когда она была захвачена осадками при формировании геологических слоев на дне моря. Естественно, что последняя, застойная зона захватывает самые нижние и самые «закрытые» этажи артези-

анских систем, где, естественно, преобладают высокоминерализованные и рассольные воды.

В этой логически ясной схеме встречались и нарушения: иногда под сильно солеными водами оказывались менее соленые; нарушали стройную картину смены состава вод – трещинные воды кристаллического фундамента или карстовых полостей. Все это получало объяснения, исходя из местной реальной обстановки, и узаконились термины «нормальной» и «обратной зональности» подземных вод; причем последняя, т.е. обратная зональность, считалась как бы ненормальной.

Конечно, жестких границ между этими зонами установить было невозможно, не говоря о том, что далеко не все специалисты вообще разделяли такую концепцию.

Ученые хорошо знают, что открытие нового явления и метода его надежной оценки иногда опрокидывают устоявшиеся представления.

Так, похоже, получается в результате создания нового портативного прибора, позволяющего быстро и с высокой точностью определять количество растворенного в воде гелия. Результатам использования этого нового метода посвящена статья И.Н. Яницкого и В.В. Пименова.

Как изучение из космоса открыло новые структурные особенности поверхности Земли и ее недр – слишком велики оказались эти образования, для того чтобы они обнаруживались наземной или самолетной съемкой, – так и водно-гелиевая съемка с удивительной детальностью и отчетливостью проявила новый тектонический рисунок на поверхности.

Водно-гелиевая съемка показывает, что любое «слабое» место земной коры, любые гидрогеологические окна в мощных толщах осадочных артезианских систем, тем более разрывные нарушения, являются путями движения гелия снизу вверх вместе с водой, грубо говоря, в вертикальном направлении. Инертность гелия и его низкое и более или менее одинаковое содержание в приземной атмосфере и в подземных водах, близко связанных с атмосферным питанием, т.е. преимущественно на небольших глубинах, но его резкое, на несколько порядков, увеличение в водах кристаллического ложа, если даже оно оказывается возле дневной поверхности, – все это

вместе взятое показывает, что гелий оказался удивительной природной меткой, помогающей определять миграцию природных и техногенных вод в земной коре и, вероятно, в поверхностных водоемах.

Механизм его перехода из области критических (для воды) температур и давлений неизвестен. Какие флюиды (и флюиды ли вообще) заставляют его пополнять нижний этаж подземной гидросферы, гидрогеологи не знают и едва ли смогут объяснить этот процесс и механизм, пользуясь своими традиционными методами.

Но как только гелий попадает в область «настоящей» воды, механизм становится более или менее понятным для нашей профессии. Огромное геостатическое давление и (или) гидростатический напор заставляют воду «искать» любую ослабленную зону или, еще «лучше», разлом и вместе с растворенным гелием стремиться к поверхности. Поскольку такого рода наблюдения подтверждаются на огромных территориях и в тысячах точек, возникает вопрос: откуда берется этот гелий?

Кто ответит на этот вопрос, опираясь на факты и статистически однозначно подтвержденные наблюдения водно-гелиевой съемки?

С точки зрения охраны водных ресурсов и, более широко, охраны окружающей среды, нам важны следующие обстоятельства.

Только отсутствие нарастания сигналов гелия сверху вниз от поверхности к глубоким горизонтам осадочного чехла может быть известной гарантией того, что токсичные промышленные стоки, нагнетаемые в эти горизонты, действительно оказываются захороненными, т.е. изолированными от среды обитания человека. В каждом реальном участке это положение должно быть тщательно доказано.

Иные изолированные условия, по крайней мере, на Земле, имеются только в центральных частях ледяного купола Антарктиды в том случае, если имеется возможность гарантированно рассчитать и соотнести скорость протаивания и выноса в Мировой океан со временем распада радиоактивных осколков до безопасного уровня.

Другое обстоятельство имеет, если так можно выразиться, диаметрально противоположное направление. Низкий уровень сигнала гелия в атмосферных осадках и речных водах позволяет проследживать глубину и скорость проникновения поверхностных вод в водоносные горизонты с пресной или слабоминерализованной

водой, горизонты, используемые как источники водообеспечения для самых разнообразных нужд человека. Возможно, впервые в истории науки появляется возможность построения численной модели влагообмена и скоростей восполнения бассейнов подземных вод и проведение на этой основе подлинной границы зоны активного водообмена, если она действительно существует. Но, может быть, еще более важно применить водно-гелиевый метод для попытки рассчитать возможность использования естественных емкостей подземных вод в периоды маловодных лет как временные резервы воды, восполнимые в периоды многоводных лет и работающие как водохранилища, не занимая больших площадей на поверхности.

И, наконец, последнее. С того момента, как вулканологи США установили постоянные наблюдения на Гавайских вулканах, идут споры – есть ли вода (конечно, речь идет о водяном паре) в возгонах лавы, а если есть, то «попутная» ли эта вода, захваченная при подъеме лавы, или ювенильная, т.е. содержащаяся в глубоких недрах, откуда поступает лава. С тех пор количество данных прямых наблюдений сильно увеличилось, а ясности нет. Может быть, теперь появится такая возможность. И вопрос не в том, существует ли ювенильный приток воды, а в том, каков его объем. Ведь, в конце концов, конденсат всегда имеет шансы быть маломинерализованным, поскольку с глубин может поступать, теоретически говоря, конденсат – дистиллированная вода.

Я полагаю, что на все эти вопросы будет легче ответить, если прибор, фиксирующий с высокой точностью сигналы гелия в водном растворе, будет сконструирован так, чтобы его можно было опускать на забой глубоких и сверхглубоких скважин и получать надежные замеры дистанционно.

Другая статья, Н.В. Роговской, касается естественной защищенности подземных вод от загрязнения. В этом отношении подземные воды имеют известные преимущества перед поверхностными. Эти последние полностью беззащитны от техногенного загрязнения – промышленные и коммунальные стоки, стоки с полей с их ядохимикатами и минеральными удобрениями и даже выбросы в атмосферу рано или поздно оказываются в реках, озерах и водохранилищах, в соответствии с присловьем: «Все в море будет».

Огромная самоочищаемая способность рек во многих случаях оказывается на пределе или даже за этим пределом. В таком положении, например, оказываются крупные участки Волги.

Как же обстоит дело с подземными водами?

Давно известна и многократно публиковалась цифра, предложенная видным гидрогеологом Геологической службы США Р. Нейсом. Нейс считает, что в толще первой полумили пород заключено около 4 млн км³ пресной и слабоминерализованной воды, т.е. объем, в 140–150 раз превышающий объем годового стока всех рек Земли. Грубо говоря, эту толщу глубиной около 800 м, может быть, надо рассматривать как зону активного водообмена, о которой упоминалось выше. Цифра Нейса, конечно, далека от точности, но порядок величин она отражает.

Что же следует из этого с точки зрения охраны подземных вод от загрязнения?

Цифра «150» показывает, что водообмен в подземных водах происходит во столько же раз медленнее, чем водообмен поверхностных вод (в одних случаях эта разница может быть всего в несколько десятков раз, в иных – во много сотен раз, но мы берем некоторое среднее значение).

Хорошо известно, что чем застойнее вода, тем быстрее она загрязняется и медленнее самоочищается. Примеры каскадов из крупных водохранилищ демонстрируют это с поразительной ясностью. Приходится лишь удивляться, какой могучей способностью к самоочищению, например, все еще обладает Волга ниже последнего искусственного барьера – Волгоградской плотины. И это при сравнительно низких ее скоростях течения на почти безуклонном отрезке и множестве дельтовых протоков.

Конечно, нельзя механически подходить с этой меркой к подземным водам и считать, что в среднем подземные воды будут очищаться, если их загрязнять, в 150 раз медленнее. Но этот факт нельзя сбрасывать со счетов. Его очень важно учитывать, но как это делать точно – не знаю. Для подтверждения сказанного приведем «типичный пример серьезного загрязнения подземных вод в результате непреднамеренной случайности, произошедшей на северо-востоке страны (США. – В.К.) в 1957 г., когда 30 тыс. галлонов (около 110 тыс. л. – В.К.) реактивного топлива (что-то

сходное с керосином? – В.К.) было разлито по поверхности на военно-воздушной базе. Водоносный горизонт, представленный трещиноватыми кристаллическими породами, оказался столь загрязненным, что в течение 15 лет после этого не удавалось восстановить существовавшую ранее традиционную систему водоснабжения базы из буровых скважин»³.

Я обращаю внимание на характер водоносного горизонта – трещиноватые кристаллические породы, характерные обычно тем, что они содержат ультрапресные активно сменяемые воды и что речь идет о наиболее увлажненной территории США – северо-востоке страны. Что же можно ждать, скажем, от заиленных песков с относительно слабой водоотдачей и соответственно ничтожными скоростями движения, т.е. более или менее типичных условий для водоносных горизонтов, воду которых потребляют десятки или сотни миллионов сельских жителей на всех континентах.

Другим «отягчающим» обстоятельством для подземных вод являются гидробионты. Все живое в поверхностных водах – макро-растительность и фитопланктон «работают» на «очистку» воды хотя бы одной своей фотосинтезирующей деятельностью, обогащая воду кислородом. Огромную положительную очистительную роль играют микроорганизмы, пока не достигнут порог их жизнедеятельности от чрезмерного загрязнения. В подземных водах есть, конечно, микроорганизмы, но их так мало, что едва ли они могут иметь «очистительное» значение.

Еще одно «отягчающее» обстоятельство для подземных вод – та среда, которую они заполняют. Всем, конечно, известно, что одним из мощнейших инструментов искусственной очистки загрязненных вод является фильтрация их через песчаные фильтры. Время от времени эти фильтры заменяются или как-то восстанавливаются и продолжают свою полезную деятельность. В природе никто не может заменить или регенерировать фильтрующую среду: вода практически всегда идет через одни и те же породы. Кроме того, в природе очень редко встречаются те чистые пески, которые используют для очистных фильтров на станциях очистки. Тем не менее, в ряде случаев загрязненные воды могут в процессе естественной

³ Miller D.M., Scaf M.R. New Priorities for Ground-Water Quality Protection Ground Water. November – December 1974, p. 342.

фильтрации в естественных условиях самоочищаться. Это показал и большой опыт искусственного восполнения подземных вод. При этом процесс очистки ничего не стоит.

К сожалению, это довольно редкое явление и в природе, и в искусственных ситуациях.

Чаще всего породы содержат много мелкозема, коллоидных частиц, а главное, пожалуй, заключается в том, что происходит лавинообразное появление все новых и новых загрязнителей. Речь, по существу, идет о появлении сотен, точнее тысяч, новых ингредиентов в год, оказывающихся в сточных водах и проникающих в подземные воды. Некоторые из них могут быть токсичными, а о действии на организмы многих из них (особенно совместном) вообще нет сведений.

Великолепные расчетные схемы распространения загрязнителей, созданные аналитическим гением гидромехаников или воспроизведенные на моделях, математических и физических, не имеют практического значения, если не дан анализ сложных взаимоотношений между раствором и породой. Эти взаимоотношения, определяемые раньше в основном ионным обменом и известные давно, касались преимущественно привычных нам солей в ионной или иных формах.

Теперь все бесконечно усложнилось: различные фенолы, нефть и ее многочисленные дериваты, детергенты и пестициды, минеральные удобрения «азотных и фосфатных» рядов, не усваиваемые почвенными микроорганизмами, и многое, многое другое. Как это все взаимодействует, как сорбируется, как и с какой скоростью разлагается и какие новые соединения возникают, как все это соотносится с поровыми растворами и т.п. – вот далеко не полный перечень практически нерешенных вопросов, и для их решения нужны многочисленные наблюдения, реальные только при наличии автоматического сбора и дистанционной передачи информации. Поэтому начало, положенное картированием естественной защищенности подземных вод, имеет важное государственное значение.

Вот что у меня получилось, когда редакция «Природы» попросила меня прокомментировать статьи, касающиеся подземных вод. Но все сказанное относится лишь к отдельным сторонам проблемы охраны подземных вод.

А есть ли общая концепция охраны подземных вод? Есть ли границы использования ресурсов, есть ли границы для систем искусственной очистки от загрязнения? Есть ли, грубо говоря, какая-то общая стратегия?

Такие вопросы, естественно, возникают у каждого мыслящего человека, понимающего, что прогресс научно-технической революции и развития промышленного и сельскохозяйственного производства и в качественном и в количественном отношении безграничны, по крайней мере, в пределах обозримой перспективы.

Да, общая стратегия вроде бы есть.

Если говорить о подземных водах, то первая теоретическая позиция заключается в единстве природных вод. Это одна из величайших теоретических концепций о природе нашей планеты, автором которой является В.И. Вернадский. Но в жизни эту концепцию нередко мешает практически использовать ведомственная разобщенность. Если одно ведомство занимается только поверхностными водами, а другое только подземными, то налицо оказывается поразительный разрыв между теорией и практикой, неизбежно отрицательно отражающийся в повседневной жизни.

Бесполезно говорить о борьбе с загрязнением только подземных вод или только поверхностных вод. Несмотря на то, что методы сбора первичной информации нередко различны, методы оценки процессов иногда также различны, в широком научном плане можно говорить только о единой системе борьбы с загрязнением природных вод, имея при этом в виду не только воды суши, но также водяные пары атмосферы и воды морей и океанов.

Мало того, в нашей стране выработан единый комплексный подход к использованию и охране водных ресурсов. Такая единая концепция очень важна, так как она предусматривает, с одной стороны, как-то сбалансировать, нейтрализовать что ли, требования, часто противоречивые, различных заинтересованных сторон к природным водам как важнейшему природному ресурсу, а с другой стороны, сохранить этот ресурс в чистоте.

Гигантская природная система круговорота воды в природе будет работать безотказно, пока существует Солнце. Человек еще не обладает возможностью сколько-нибудь существенно ускорять или

замедлять работу этого отлаженного природного механизма. Но человек уже в состоянии изменять качественный состав воды в очень заметных размерах и притом не только в жидкой, но и в газообразных фазах гидрологического цикла.

Задача состоит в том, чтобы комплексное использование и охрана водных ресурсов обеспечивали облагораживание этих ресурсов. Плановая, и только плановая система ведения хозяйства и развития в общегосударственном масштабе могут обеспечить удовлетворительное решение всех проблем водопользования.

Теперь – о стратегии в использовании и охране водных ресурсов «на перспективу».

Пришла пора психологической перестройки: надо понять, что очистные сооружения, за редким исключением, всей проблемы решить не могут. И если исходить из концепции примата очистных сооружений, то любое государство может быть разорено, так как по мере качественных изменений и количественного роста производства очистные сооружения будут все дороже и сложнее. Уже в ближайшие годы удельная стоимость очистки воды и стоимость эксплуатации очистных сооружений резко возрастут. Но при этом часть загрязнителей, и при том опасных, останется в сточных водах. Сами же объемы сточных вод становятся столь большими, что концепция разбавления их чистой речной водой с таким расчетом, чтобы поток после разбавления нес вполне удовлетворительную воду, теряет всякое практическое значение.

Таким образом, единственное радикальное решение проблемы – это создание безотходных производств по «примеру» природы. Но категорически не следует смешивать эту точку зрения с лозунгом «назад к природе». Этот «пейзанский идеализм» не имеет ничего общего с тем, о чем здесь говорится. И если лозунг все же нужен, то нужно говорить «вперед к природе!». Огромное число процессов и явлений природы еще не поняты и не ясно, как их можно использовать технологически. Постановке этих вопросов был посвящен ряд докладов по охране биосферы на Общем собрании АН СССР, в том числе А.П. Виноградова, С.С. Шварца, В.А. Ковды, Б.Н. Ласкорина⁴.

⁴ Мы обращаем особое внимание на статью Б.Н. Ласкорина «Создание технологических процессов, исключающих вредное воздействие промышленности на биосферу». – «Водные ресурсы», 1973, №5.

Мы не предлагаем ничего нового. Все сказанное известно. Ясно, что во многих случаях безотходное производство (в том числе и без сброса загрязненных стоков) можно реализовать уже сегодня.

Самое удивительное при этом, что более совершенные технологические процессы переработки, требующие, естественно, дополнительных вложений, иногда значительных, дают значительно большую прямую или косвенную прибыль.

Но практически главная трудность для уже разработанных или, по крайней мере, теоретически доказанных методов более совершенного использования ресурсов заключается в наличии не прямой, а косвенной прибыли, т.е. для данного ведомства этот дополнительный ресурс или товар не нужен ему, не планируется и является для него лишь обузой. В общем, и тут повторяется все то, о чем мы ежедневно читаем во всех газетах: о трудностях с внедрением нового.

В создании безотходных производств такая ситуация будет встречаться на каждом шагу, и если противоречия между ведомственными и государственными интересами не будут преодолены, любые конкретные предложения в этом направлении окажутся нереальными. Таким образом, главная трудность носит организационный характер.

Конечно, для множества производств нет пока ни технологического, ни даже теоретического решения, и поэтому для ученых, конструкторов, технологов и экологов (будем называть так биологов, которые знают не только биологию, но и возможности приспособления видов и сообществ к изменяющимся жизненным условиям) непочатый край деятельности. Однако, повторяю, начинать надо с организационных мероприятий. Решение проблемы по созданию замкнутых и безотходных производств в масштабе всей страны, вероятно, возможно в течение примерно четверти века или даже большего времени. Но для этого должны быть приняты безотлагательные мероприятия уже теперь. Они должны заключаться в том, что любое производство, проектируемое и планируемое в наши дни, должно удовлетворять в первую очередь указанные принципы. Если этого не будет сделано сегодня, нет никаких гарантий, что мы не поставим следующее за нами поколение в довольно трудное положение.

Необходимо отказаться от изолированного планирования по отраслям и направить, как это ни трудно, свою основную деятель-

ность на комплексное планирование безотходного производства, независимо от ведомственных выгод, но имея в виду общегосударственную эффективность. Другого пути у нас нет, и это доступно только централизованному планированию.

Конечно, имея в виду «дальний прицел», нельзя действовать без учета требований сегодняшнего дня. И это наиболее очевидный раздел деятельности: надо выполнять существующие решения в отношении конкретных объектов (Волга, Урал и т.п.) и общие законы Советского государства (охрана природы, охрана водных ресурсов и др.).

Хотелось бы обратить внимание на два нерешенных вопроса, представляющих наиболее слабые и потому наиболее опасные стороны организационного, научного и технического решения всей проблемы: мероприятий, связанных с улучшением окружающей среды, дальнейшее развитие и контроль. Невозможно представить себе всеобъемлющий надведомственный орган в масштабе всего государства, а тем более в глобальном масштабе, который разрабатывал бы и внедрял новые методы очистки и новое размещение производств, создавал бы новую безотходную технологию, обеспечивал бы международные договоры, да еще контролировал бы уровни загрязнения вод и т.п. Такой орган, который «все может и все должен», – утопия.

Эта негативная позиция позволяет обосновать позитивные соображения:

- все, что связано с разработками и внедрением новых методов очистки и новых безотходных производств, – дело министерств и ведомств;
- все, что связано с новыми принципами размещения производств, населенных пунктов и общественного транспорта, – дело плановых органов. Люди, занятые планированием, должны коренным образом изменить рутинный образ мышления и работы. Это все очень трудно, но иного пути не видно.

Состояние контроля качества воды не является удовлетворительным, но в этой сфере гораздо больше организационных проблем, чем научных, и обсуждать их здесь было бы неуместно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев В.С., Еремеев А.Н., Яницкий И.Н. – «ГЕОХИМИЯ», 1974, №7.

2. Дикун А.В., Коробейник В.М., Яницкий И.Н. – «ГЕОХИМИЯ», 1975, №11.
3. Коробейник В.М., Яницкий И.Н. – «ДАН», 1975, Т. 221, №2.
4. Семихатов А.Н. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. М., Сельхозгиз, 1954.
5. Семихатов А.Н., Духанина В.И. – «ТРУДЫ ВСЕГИНГЕО», Сб. 14. М., 1956.
6. Стронг М., Кунин В.Н. ПРИРОДНАЯ СРЕДА – ЕДИНОЕ ЦЕЛОЕ. – «Природа», 1973, №5.
7. Шипунов Ф. Я. НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ ЛАНДШАФТНОЙ СФЕРЫ, – «Природа», 1971, №5.
8. Яницкий И.Н., Коробейник В.М., Созинова Т.В. – «ГЕОТЕКТОНИКА», 1975, №6.
9. Kunin V.N., Kovalevsky V.S., Eremeev A.N., Yanitsky I.N. – MEMORIES OF THE CONGRESS IN MONTPELLER, France. Т. X., 1974.

Менкель Михаил Федорович

(26.12.1898 – 8.8.1972)



Михаил Федорович Менкель – крупнейший учёный, талантливый инженер-гидротехник, один из основоположников современной теории рационального использования водных ресурсов, доктор технических наук, профессор.

М.Ф. Менкель родился 26 декабря 1898 г. в г. Москве. После окончания средней школы в 1916 г. поступает в Московское высшее техническое училище (МВТУ), но война прерывает учёбу, он призывается в армию. В 1916–17 гг. служил в царской армии, где получил чин прапорщика артиллерии, затем (1919–21 гг.) поступил на службу в Красную армию, его последняя должность – командир батареи 17-й конноартиллерийской дивизии РККА. В 1921 г. М.Ф. Менкель демобилизовался и возобновил учёбу в МВТУ. В 1929 г. окончил инженерно-строительный факультет МВТУ по специальности инженер-гидротехник.

Практическую трудовую деятельность в этой области М.Ф. Менкель начал ещё студентом МВТУ в 1926 г. в проектно-изыскательском тресте «Водоканал» (позднее «Водоканалпроект»), где за короткое время он прошёл путь от старшего техника до заместителя главного инженера треста (1932 г.).

В 1931–37 гг. преподавал в Военно-инженерной академии им. В.В. Куйбышева: сначала в должности преподавателя, а затем – заместителя начальника кафедры гидротехнических сооружений. К этому времени относятся первые значимые публикации (в соавторстве с С.Н. Крицким), например: Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчёт многолетнего регулирования стока на основе теории вероятности.

Труды ВИСУ, Гидротехнический сборник. №4, М.: Госстройиздат, 1932.

В полной мере инженерный талант М.Ф. Менкеля проявился во время его работы в институте Гидропроект (1937–61 гг.); его последняя должность в этот период деятельности – заместитель главного инженера Института. Он принимал непосредственное участие в проектировании крупных гидротехнических сооружений: Цимлянский гидроузел на р. Дон, Волго-Донской судоходный канал, Куйбышевский, Волгоградский и другие гидроузлы Волжско-Камского каскада, каналы Донец-Донбасс и Днепр-Кривой Рог, гидроузел Садд-Эль-Аали на р. Нил и многих других.

В период Великой отечественной войны в 1941 г. М.Ф. Менкель был заместителем начальника гидротехнической экспедиции Главного управления оборонительных работ при штабе Западного фронта. Научная деятельность Михаила Федоровича практически не прерывалась: после цикла работ 1940–41 гг. уже в 1944 г. выходят его статьи в журнале «Гидротехническое строительство» (№№1–2 за 1944 г. и №5–6 за 1944 г.) и далее постоянно по несколько работ в год.

Вся трудовая биография М.Ф. Менкеля характеризуется умением сочетать глубочайшие научные исследования с напряжённой производственной деятельностью. В 1944–61 гг. он совмещал работу в Гидропроекте с научной деятельностью в Секции водохозяйственных проблем Академии Наук СССР, а после её реорганизации – в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского.

В 1947 г. М.Ф. Менкель защитил докторскую диссертацию. В 1966 г. ему было присвоено учёное звание профессора по специальности «Гидравлика и инженерная гидрология».

М.Ф. Менкель – талантливый инженер, однако его имя неотделимо от гидрологической науки. Начало научной деятельности Михаила Фёдоровича относится к периоду его работы в институте Водоканалпроект над первой Генеральной схемой водоснабжения Донбасса, когда потребовалось решить проблему расчёта водохранилищ многолетнего регулирования. Здесь состоялась его первая встреча с Сергеем Николаевичем Крицким, положившая начало их совместной плодотворной деятельности на протяжении многих лет. Тогда же закладываются основы нового научного направления – теории регулирования речного стока, которая позднее полу-

чила дальнейшее развитие и была изложена в совместных фундаментальных работах: Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. АН СССР, 1950. 391 с.; Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчёты. М., Гидрометеиздат, 1952. 392 с.; Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Россинский К.И. Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов. Л.: Госэнергоиздат, 1968. 154 с.

В 1951 г. коллектив в составе С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, К.И. Россинский, Я.Д. Гильденблат, В.Р. Казак, Д.В. Коренистов, И.А. Кузьмин был удостоен Государственной премии СССР (в 1951 г. – Сталинская премия в области технических наук) за упомянутый выше капитальный труд «Гидрологические основы речной гидротехники».

С 1961 г. М.Ф. Менкель получает возможность сосредоточить свои усилия на научной работе, направленной на обобщение своих многолетних трудов в области водных проблем. Он работал в Совете по изучению производительных сил (СОПС) при Госплане СССР в должности заведующего отделом комплексного использования водных ресурсов, с 1965 г. руководил Московской лабораторией Государственного Гидрологического института (ГГИ).

С ноября 1968 г. в порядке перевода из ГГИ зачислен ВРИО заведующим отделом экономических проблем водного хозяйства Института водных проблем АН СССР; в феврале 1969 г. утверждён заместителем директора Института по научной работе.

В Институте водных проблем Михаил Федорович вёл интенсивную, плодотворную научную и научно-организационную работу. Он принимал непосредственное участие в разработке основных направлений использования и охраны водных ресурсов страны на предстоящие десятилетия, в исследованиях по проблеме Аральского моря, по теории регулирования стока и в других важнейших работах Института.

М.Ф. Менкелем опубликовано около 100 научных работ, многие из них широко известны в нашей стране и за рубежом, переведены на иностранные языки. Значительная часть работ написана в соавторстве с С.Н. Крицким.

Глубокие знания и большой производственный опыт М.Ф. Менкеля позволили ему в течение многих лет быть постоянным членом Государственной экспертной комиссии Госплана СССР и участво-

вать в рассмотрении проектов важнейших водохозяйственных и гидротехнических сооружений страны.

М.Ф. Менкель владел английским, французским и немецким языками, был избран почётным членом Венгерского гидрологического общества, работал в ряде учёных и научно-технических советов.

Награждён орденами Трудового Красного знамени (1952 г.) и Знак почёта (1958 г.); медалями СССР.

Михаил Федорович Менкель – крупный учёный, талантливый инженер, человек высокой организованности и работоспособности. Он обладал лучшими человеческими качествами: его принципиальность, интеллигентность, доброжелательность, чуткость, внимание к людям и забота о них, исключительная выдержка и такт привлекали к нему всех, кому посчастливилось работать и встречаться с ним.

Л.Ф. Сотникова (ИВП РАН)

Найдёнов Вячеслав Иосифович

(26.1.1947 – 14.2.2006)



Вячеслав Иосифович Найдёнов – крупный учёный, специалист в области прикладной математики, стохастического моделирования природных процессов, нелинейной гидрологии; доктор физико-математических наук; профессор.

В.И. Найдёнов родился 26 января 1947 г. в с. Скородное Прохоровского района Белгородской обл., в семье служащих. После окончания средней школы в 1965 г. поступил на факультет прикладной математики и механики Воронежского государственного университета, который окончил в 1970 г. по специальности «механика».

В том же году был принят в аспирантуру Института проблем механики АН СССР, в 1973 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «механика жидкости, газа и плазмы» и продолжил работу в Институте на должности младшего научного сотрудника. В 1975 г. был избран по конкурсу на должность старшего преподавателя кафедры прикладной математики Крымского государственного университета в г. Симферополе; в 1976 г. переведён в Институт высоких температур АН СССР. В 1978 г. перешёл на работу в Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт механизации и энергетики лесной промышленности, где проработал 11 лет. В 1989 г. Вячеслав Иосифович защитил докторскую диссертацию и поступил на работу в Институт водных проблем РАН, в котором трудился до последних лет жизни; из них более 10 лет возглавлял лабораторию поверхностных вод.

В.И. Найдёнов – исключительно разносторонний и деятельный учёный; им получены важные результаты в различных отраслях

науки. В области гидрологии: им предложена гипотеза теплового гистерезиса испарения для описания колебаний увлажнённости речных водосборов и уровней водоёмов; на этой основе была построена стохастическая модель колебаний уровня Каспийского моря. Создана оригинальная нелинейная модель колебаний гидросферы, состоящая из системы нелинейных осцилляторов и объясняющая хаотическое поведение природных процессов, предложено объяснение физического механизма известного эмпирического закона Херста. Исследован цикл одномерных и двухмерных уравнений Фоккера–Планка, на основе которых решён ряд практических задач об изменениях уровня режима водоёмов. Вячеслава Иосифовича всегда увлекали глобальные проблемы. В одной из своих последних работ он предложил новую модель численности населения Земли, которая описывает известные демографические данные и даёт прогноз на ближайшее будущее. Он был необычайно смелым человеком, брался за решение острых, животрепещущих проблем, не боялся публиковать кардинально новые результаты, которые нередко критически воспринимались его современниками.

Вячеслав Иосифович передавал свои знания молодому поколению. Он читал курсы прикладной математики в Институте экономики, финансов и права и в Международном Славянском университете.

Вячеслав Иосифович совмещал в себе великолепное владение современными математическими методами и глубокое проникновение в физическую сущность изучаемых явлений. Он был наделён редким даром учёного – выявлять глубинные механизмы сложных процессов, делать сложное – простым. Это умение позволило ему стать успешным популяризатором науки. Он выступал на телевидении и в газетах, доводил до широкой публики достижения учёных по актуальным вопросам. Несколько статей вышло в известном междисциплинарном журнале «Природа».

В.И. Найдёнов – автор более 100 научных работ, в том числе одна монография – «Нелинейная динамика поверхностных вод суши», вышедшая в издательстве «Наука» в 2004 г. Результаты его исследований публиковались в ведущих научных журналах: «Доклады Академии наук», «Вестник РАН», «Водные ресурсы», «Теоретические основы химической технологии», «Метеорология и гидрология» и др.

Вячеслав Иосифович был открытым, искренним и доброжелательным человеком, интересным собеседником, в то же время исключительно принципиальным и требовательным в науке.

М.И. Степанова (ИВП РАН)

В.И. Швейкина (ИВП РАН)

Хаотическая динамика гидросферы и климата¹

В.И. Найдёнов, И.А. Кожевникова

В статье [1] исследован временной ряд температуры более чем за 900000 лет на основании анализа данных по изотопному составу кислорода в осадочных породах из экваториальной зоны Тихого океана, и сделан вывод о том, что этот ряд порожден хаотическим аттрактором малой размерности 3.1.

И.И. Пригожин [2] выдвинул гипотезу о том, что изменения климата обусловлены глобальной хаотической динамикой, и небольшого числа независимых переменных может оказаться достаточным для объяснения крупномасштабных вариаций климата Земли.

Тот факт, что размерность аттрактора выражается нецелым числом, служит естественным ключом к пониманию внутренней изменчивости и непредсказуемости климатической системы, поскольку обе эти особенности относятся к основным свойствам хаотической динамики.

Подчеркнем, что хаотический аттрактор способен порождать множество стохастических процессов. По этой причине флуктуации климата можно рассматривать как проявление хаотического характера самого аттрактора.

Покажем, как в принципе в глобальных гидросферных и климатических процессах могут возникать хаотические колебания.

Простая модель климата

Рассмотрим модель климата [3–6], состоящую из уравнений теплового и водного баланса, динамики речного стока и диоксида углерода

$$\begin{aligned} c \frac{dT}{dt} &= \frac{S_0}{4} (1 - \alpha(W_1, W_2, \dots, W_N, T)) - I(T, C) \\ \frac{dW_i}{dt} &= P_i(T) - E_i(W_i, T) - q_i(W_i) - Q_i \\ t_i \frac{dQ_i}{dt} &= G_i(W_i) - Q_i \\ t_C \frac{dC}{dt} + (C - C_S) &= n(T - T_S), \quad i=1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

¹ В.И. Найдёнов, И.А. Кожевникова Хаотическая динамика гидросферы и климата // Доклады академии наук, Т. 378, №1, с. 51–57.

где T, C, W_i, q_i, Q_i – соответственно приповерхностная глобальная температура воздуха, концентрация диоксида углерода в атмосфере, влагозапас континентов, поверхностный и подземный сток; S_0, I, α – солнечная постоянная, количество уходящей длинноволновой радиации с верхней границы атмосферы и планетарное альbedo Земли; P_i, E_i – величины осадков и испарения с поверхности континентов; G_i, t_i – соответственно эффективное ускорение силы тяжести и характерное время задержки подземного стока в зоне активного водообмена, t_C – время релаксации диоксида углерода, n – величина, характеризующая скорость выделения диоксида углерода с поверхности океана и материков в атмосферу, c – теплоемкость системы «атмосфера – деятельный слой подстилающей поверхности».

Число динамических переменных системы равно $2N+2$. При $N=1$ рассматривается вся Земля; при $N=2$ – Северное и Южное полушария; при $N=6$ – Европа, Азия, Африка, Северная и Южная Америка, Океания.

Отметим, что четвертое уравнение модели (1) устанавливает динамическое равновесие между парциальным давлением диоксида углерода в атмосфере и его содержанием в гидросфере. С ростом температуры растворимость газа в океане уменьшается и он накапливается в атмосфере, что приводит к ее разогреву и к зависимости $I=I(T, C), dI/dC < 0$.

Таким образом, размерность фазового пространства модели может изменяться в пределах от 4 до 14. Нас будет интересовать наименьшее число степеней свободы, при котором система (1) имеет хаотические колебания.

Поставим вопрос о существовании странного аттрактора для системы нелинейных дифференциальных уравнений (1):

$\partial_t \vec{R} = \vec{F}(\vec{R}), \vec{R} = \{T, W_i, Q_i, C\}$, здесь F – правая часть (1). Предположим, что при $S_0 = \text{const}$ существует стационарное решение (1), т.е. $\vec{F}(\vec{R}_s) = 0$. В окрестности стационарного состояния разложим правые части (1) в ряд по степеням Тейлора, причем для простоты ограничимся только третьими степенями разложения с целью исследовать симметрично относительно этого состояния решения. Если предположить, что $\vec{F}(\vec{R})$ может содержать дифференциальные операторы, характеризующие пространственный перенос импульса, тепла,

диоксида углерода, то в этом случае можно формулировать задачи не только о временном, но и пространственном хаосе в климатологии и гидрологии.

Далее для простоты примем, что времена релаксации подземного стока всех континентов одинаковы, $t_i = \bar{t} = const$.

Введем коэффициенты

$$\alpha_i = -\frac{S_0}{4} \frac{\partial a}{\partial W_i}, p_i = \frac{dP_i}{dT} - \frac{\partial E_i}{\partial T}, a_i = -\left(\frac{\partial E_i}{\partial W_i} - \frac{dq_i}{dW_i}\right),$$

$$b_i = \frac{1}{6} \left(\frac{\partial^3 E_i}{\partial W_i^3} + \frac{d^3 q_i}{dW_i^3}\right), d_i = \frac{dG_i}{dW_i}, e_i = \frac{1}{6} \frac{d^3 G_i}{dW_i^3}.$$

Эти производные вычислены при $\vec{R}_s = \{T_s, W_i^s, Q_i^s, C_s\}$. По физическому смыслу эти коэффициенты положительны, так как альбедо уменьшается с ростом влагозапасов суши, величина осадков с ростом глобальной температуры увеличивается, а испарение с поверхности хорошо увлажненной суши, как показано в [6], уменьшается с увеличением влагозапаса суши. Кроме того, предполагается, что с ростом влагозапаса континентов сильно увеличивается поверхностный и подземный сток.

Введем безразмерные величины:

$$\theta = \frac{T - T_s}{T_s}, X_i = \frac{W_i - W_i^s}{W_i^s}, Y_i = \frac{Q_i - Q_i^s}{Q_i^s}, \bar{C} = \frac{C - C_s}{C_s}, \tau = \frac{t}{\bar{t}}, \Lambda = \frac{t_C}{\bar{t}},$$

$$m = c^{-1} \left(\frac{S_0}{4} \frac{\partial \alpha}{\partial T} + \frac{dl}{dT}\right) \bar{t}, \bar{n} = \frac{nT_s}{C_s}, \zeta = \frac{l'_C C_s \bar{t}}{cT_s}.$$

Тогда система (1) может быть сведена к набору взаимосвязанных нелинейных осцилляторов относительно влагозапаса суши и линейных уравнений относительно температуры и концентрации диоксида углерода:

$$\ddot{X}_i + [1 - a_i \bar{t} + 3b_i (W_i^s)^2 \bar{t} X_i^2] \dot{X}_i + (d_i - a_i) \bar{t} X_i + (b_i + e_i) (W_i^s)^2 \bar{t} X_i^3 = \frac{p_i \bar{t} T_s}{W_i^s} (\dot{\theta} + \theta)$$

$$\dot{\theta} + m\theta = \frac{\bar{t}}{cT_s} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i W_i^s X_i\right) + \zeta \bar{C}, \quad (2)$$

$$\Lambda \dot{\bar{C}} + \bar{C} = N\theta.$$

О странном аттракторе модели

Рассмотрим простейший вариант (1) и докажем существование у нее странного аттрактора

Пусть $N=2, b_1=0, e_2=0, \xi=0$, тогда систему (1) можно свести к системе двух взаимодействующих нелинейных осцилляторов Дуффинга и Ван-дер-Поля:

$$\begin{aligned} \ddot{U}_1 + \mu_1 \dot{U}_1 - \frac{\omega_1^2}{2} U_1 (1 - U_1^2) &= \frac{p_1 \bar{t} T_s}{W_1^s A_1} (\dot{\theta} + \theta), \\ \ddot{U}_2 - \mu_2 (1 - U_2^2) \dot{U}_2 + \omega_2^2 U_2 + \frac{\mu_2}{3} U_2^3 &= \frac{p_2 \bar{t} T_s}{W_2^s A_2} (\dot{\theta} + \theta), \\ \dot{\theta} + m\theta &= \frac{\bar{t}}{c T_s} \left(\sum_{i=1}^2 \alpha_i W_i^s A_i U_i \right), \\ \Lambda \dot{C} + \bar{C} &= N\theta, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mu_1 = 1 - a_1 \bar{t}$, $\mu_2 = a_2 \bar{t} - 1$, $\omega_1^2 = 2(a_1 - d_1) \bar{t}$, $\omega_2^2 = (d_2 - a_2) \bar{t}$,

$$U_1 = \frac{X_1}{A_1}, U_2 = \frac{X_2}{A_2}, A_1 = \sqrt{\frac{a_1 - d_1}{e_1 (W_1^s)^2}}, A_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{3 \bar{t} b_2 (W_2^s)^2}}.$$

Коэффициенты μ_1, μ_2 характеризуют «трение» в осцилляторах, A_1, A_2 – амплитуды, $a\omega_1, \omega_2$ – частоты колебаний. При $m=1, p_2=0$ система (3) может быть сведена к уравнению Дуффинга с периодической внешней силой.

Действительно, при $\mu_2 \rightarrow 0$ второе уравнение имеет гармоническое решение $U_2 = 2 \cos \omega_2 \tau$ и система (3) принимает простейший вид:

$$\ddot{U} + \delta \dot{U} - \frac{1}{2} U (1 - U^2) = f \cos \omega \xi, \quad (4)$$

где:

$$\begin{aligned} U &= \frac{U_1}{U_1^*}, U_1^* = \sqrt{1 + \frac{2p_1 \alpha_1 \bar{t}^2}{c \omega_1^2}}, \xi = \bar{\omega}_1 \tau, \\ \bar{\omega}_1^2 &= \omega_1^2 + \frac{2p_1 \alpha_1 \bar{t}^2}{c}, \omega = \frac{\omega_2}{\bar{\omega}_1}, \delta = \frac{\mu_1}{\bar{\omega}_1}, f = \frac{2p_1 \alpha_1 \bar{t}^2 A_2 W_2^s}{c A_1 W_1^s U_1^* \bar{\omega}_1^2}. \end{aligned}$$

Исследованию хаотических колебаний осциллятора Дуффинга посвящена монография [7]; область, представляющей интерес для исследования, является: $\omega=0,8, \delta=0,15, 0,1 \leq f \leq 0,3$. В этой области наблюдается переход от периодического режима к хаотическому, периодиче-

ские окна в хаотическом режиме и выход из хаотического режима при $f=0,3$. Размерность возникающего странного аттрактора сильно зависит от параметра δ и изменяется в пределах от 2,1 до 2,8. Например, при $f=0,16, \omega=0,8333, \delta=0,15$ корреляционная размерность аттрактора равна 2,14. Границы области притяжения устойчивых стационарных точек уравнения Дуффинга (± 1) также являются фрактальными, с размерностью 1,24 (для сравнения фрактальная размерность кривой Кох равна 1,26).

Гиперболическая неустойчивая точка и две устойчивые точки характерны для такой динамической системы, как Каспийское море, которое имеет седло и две устойчивые точки.

При

$$m=1, \mu_1 < 0, \mu_2 > 0, d_i - a_i > 0, i=1,2, \eta_i = (b_i + e_i) / 3b_i,$$

$$\omega_i^2 = (d_i - a_i) \bar{t} - \frac{p_i \alpha_i}{c} \bar{t}^2, A_i = \sqrt{\frac{(-1)^i \mu_i}{3 \bar{t} b_i (W_i^S)^2}}, X_i = A_i U_i,$$

из системы (2) получим два взаимосвязанных нелинейных осциллятора:

$$\ddot{U}_1 - \mu_1(1 - U_1^2) \dot{U}_1 + \omega_1^2 U_1 + \mu_1 \eta_1 U_1^3 = \frac{p_1 \alpha_2 \bar{t}^2}{c} \sqrt{\frac{\mu_2 b_1}{\mu_1 b_2}} U_2,$$

$$\ddot{U}_2 - \mu_2(1 - U_2^2) \dot{U}_2 + \omega_2^2 U_2 + \mu_2 \eta_2 U_2^3 = \frac{p_2 \alpha_2 \bar{t}^2}{c} \sqrt{\frac{\mu_1 b_2}{\mu_2 b_1}} U_1. \quad (5)$$

Частный случай этой системы уравнений ($\mu_2 \ll 1, p_2 = 0$) исследовался в работе [8]. На основе анализа временных реализаций, отображений сдвига, фазовых портретов, спектра мощности и ляпуновского характеристического показателя установлено, что в широкой области значений параметров решение ведет себя хаотически.

О гомоклиническом сценарии перехода к хаосу

Из системы (2) можно получить обобщенное уравнение Дуффинга с переменным коэффициентом «трения»

$$\ddot{U} + \delta(1 + \Delta U^2) \dot{U} - U(1 - U^2) = f \cos \omega \tau, \Delta \geq 0, \delta \geq 0, f \geq 0.$$

Это уравнение можно записать в виде двумерной автономной системы с единственной гиперболической точкой под действием периодического возмущения

$$\vec{\dot{x}} = \vec{f}_0(\vec{x}) + \varepsilon \vec{f}_1(\vec{x}_1, \tau),$$

здесь

$$\begin{aligned}\vec{x} &= (U, \dot{U}), \quad \vec{f}_0 = (f_{01}, f_{02}) = (\dot{U}, U - U^3), \\ \vec{f}_1 &= (f_{11}, f_{12}) = (0, \bar{f} \cos \omega \tau - \bar{d}(1 + \Delta U^2) \dot{U}), \\ \varepsilon \bar{f} &= f, \quad \varepsilon \bar{\delta} = \delta, \quad \varepsilon \ll 1.\end{aligned}$$

Невозмущенный гамильтониан этой системы имеет вид;

$$H_0 = \frac{1}{2} \dot{U}^2 - \frac{1}{2} U^2 + \frac{1}{4} U^4.$$

Имеется единственная гиперболическая точка $U = \dot{U} = 0$ с единой сепаратрисой при $H_0 = 0$, где две гомоклинические траектории начинаются и оканчиваются. Решение на сепаратрисе имеет вид

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}}{ch \tau}, \quad \dot{U}_0 = -\frac{\sqrt{2} sh \tau}{ch^2 \tau}.$$

Сепаратрисы могут пересекаться в бесконечном числе точек, и это явление, впервые обнаруженное Пуанкаре, приводит к появлению областей с хаотическим поведением траекторий.

Введем функцию:

$$\begin{aligned}\Psi(\tau_0) &= -\int_{-\infty}^{\infty} (f_0, \vec{f}_1) d\tau = -\int_{-\infty}^{\infty} [f \dot{U}_0(\tau - \tau_0) \cos \omega \tau - \\ &- \bar{\delta}(1 + \Delta U_0^2(\tau - \tau_0)) \dot{U}_0(\tau - \tau_0)] d\tau = \sqrt{2} \bar{f} \pi \omega \frac{\sin \omega \tau_0}{ch\left(\frac{\pi \omega}{2}\right)} + \frac{4}{3} \bar{\delta} \left(1 + \frac{4}{5} \Delta\right),\end{aligned}$$

здесь st – скалярное произведение векторов, $\Psi(\tau_0)$ – величина, характеризующая расстояние между сепаратрисами в некоторый момент времени τ_0 .

Если $\Psi(\tau_0)$ меняет знак, то сепаратрисы пересекаются и движение в этой области является хаотическим. Как показано в [9], расщепление сепаратрис тесно связано с рождением бесконечного числа пар различных долгопериодических решений, одно из которых эллиптическое, другое – гиперболическое.

Показано, что при $\Psi'(\tau_0) > 0$ и $[5(\Psi''')^2 - 3\Psi' \Psi''](\tau_0) \neq 0$ получается бесконечное семейство устойчивых по Ляпунову [10] эллиптических реше-

ний. Выражение $\bar{f} = \frac{4}{3} \bar{\delta} \frac{ch\left(\frac{\pi \omega}{2}\right)}{\sqrt{2\pi \omega}} \left(1 + \frac{4}{5} \Delta\right)$ дает нижнюю границу хаотических режимов в плоскости (\bar{f}, ω) .

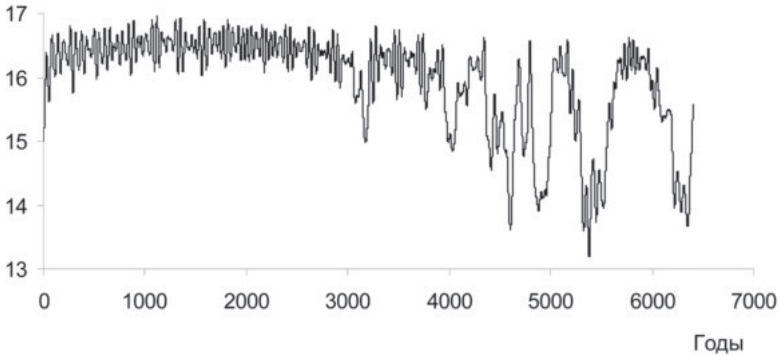


Рис. 1. Глобальная температура приземного слоя атмосферы, полученная методом математического моделирования (хаотическая реализация детерминированного процесса)

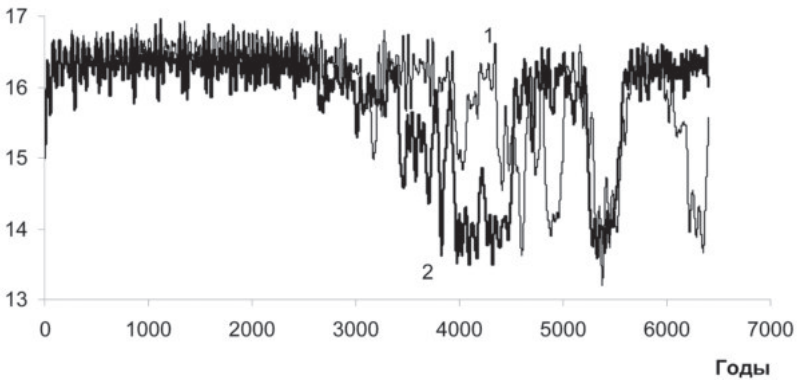


Рис. 2. Глобальная температура приземного слоя атмосферы, иллюстрирующая существенную зависимость от начальных условий: 1 – при $U'(0)=0,5$; 2 – при $U'(0)=0,49999$

Нелинейная система (2) при $N=6$ (в этом случае учитывалось влияние увлажненности шести континентов на планетарное альbedo Земли) исследовалась численными методами. Приведем конкретный вариант системы, состоящей из 14 уравнений первого порядка и имеющей хаотические решения:

$$\ddot{U}_i - \mu_i(1-U_i^2)\dot{U}_i + \omega_i^2 U_i + \mu_i \eta_i U_i^3 = \frac{p_i \bar{T} T_S}{W_i^s A_i} (\dot{\theta} + \theta), \quad i=1, 2, 3,$$

$$\ddot{U}_i + \mu_i \dot{U}_i + \omega_i^2 U_i (1-U_i^2) = \frac{p_i \bar{T} T_S}{W_i^s A_i} (\dot{\theta} + \theta), \quad i=4, 5, 6,$$

$$\dot{\theta} + m\theta = \frac{\bar{t}}{cT_s} \left(\sum_{i=1}^6 \alpha_i W_i^s A_i U_i \right) + \zeta \bar{C},$$

$$\Lambda \dot{\bar{C}} + \bar{C} = N\theta \quad (6)$$

Эта система нелинейных уравнений исследовалась численно при следующих значениях параметров:

$$\begin{pmatrix} \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ \eta_1 & \eta_2 & \eta_3 \\ p_1 & p_2 & p_3 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ A_1 & A_2 & A_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 & 0.04 & 0.04 \\ 1.2 & 1.4 & 1.7 \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0.02 & 0.03 & 0.05 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.3 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu_4 & \mu_5 & \mu_6 \\ \omega_4 & \omega_5 & \omega_6 \\ p_4 & p_5 & p_6 \\ \alpha_4 & \alpha_5 & \alpha_6 \\ A_4 & A_4 & A_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.04 & 0.04 & 0.04 \\ 0.85 & 0.8 & 0.95 \\ 0.045 & 0.05 & 0.025 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}.$$

Остальные значения параметров равны: влагозапас верхней зоны активного водообмена всех континентов принят равным $W_i^s=3$ м, глобальная температура атмосферы $T_s=288$ К, теплоемкость верхнего слоя океана $c=9,5$ (Вт/м)год, $\bar{t}=10$ лет, $m=0,85$, $\bar{n}=6,6$; $\Delta=1$, $\zeta=0,01$. Начальные условия для системы (6) были приняты следующими

$$U_i(0)=0,1, U_f(0)=0,5, \theta(0)=0, \bar{C}(0)=0,01.$$

Характерные реализации системы уравнений (6) и проекции фазовых портретов приведены на рис. 1–2. Отметим сильную зависимость решений от начальных условий. Например, при изменении лишь одного начального условия $\dot{U}_1(0)=0,5$ на $\dot{U}_1(0)=0,49999$ глобальные температуры на больших временах начинают разительно отличаться друг от друга (рис. 1б). Очевидно, что в этом случае для корректного описания поведения климатической системы необходим вероятностный подход. На рис.3 приведены логарифмы оценок спектральной плотности [11] одной из хаотических реализаций решения уравнения Дуффинга, глобальной температуры земного шара и влажности одного из шести континентов.

Анализ теплового режима планеты показал, что синхронное и синфазное увеличение (уменьшение) влагозапасов всех континентов приводит к уменьшению (увеличению) планетарного альбедо и к резкому, внезапному увеличению (уменьшению) глобальной температуры приземного слоя атмосферы и изменению климата Земли. При изменении влагозапасов одного или двух континентов глобальная температура изменяется не столь резко.

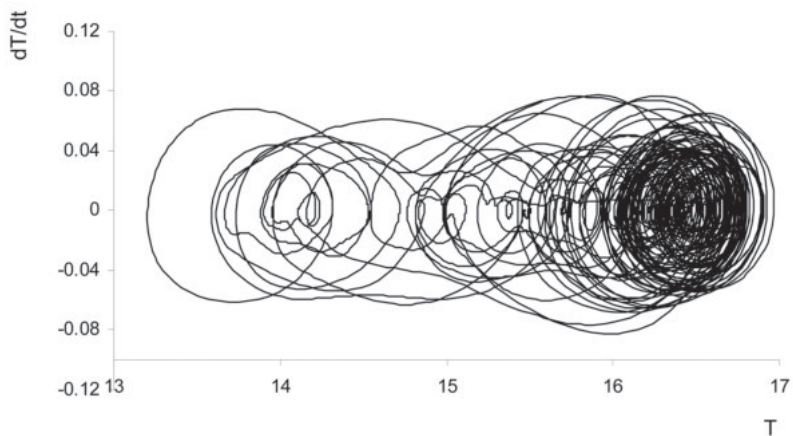


Рис. 3. Фазовый портрет хаотических колебаний температуры в координатах температура – ее производная

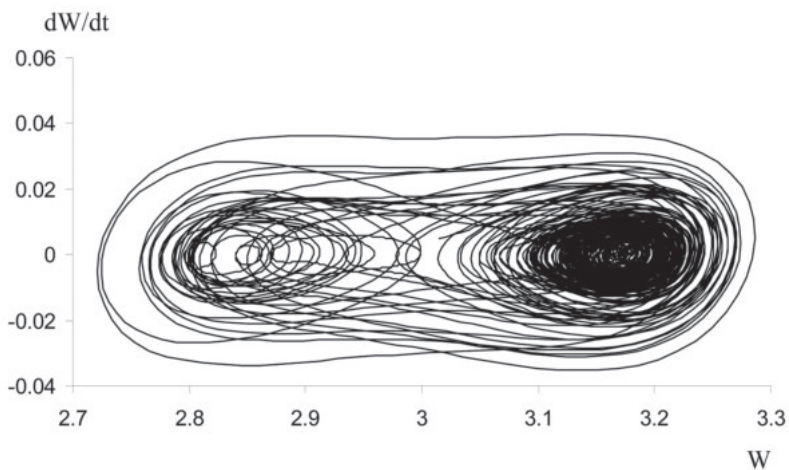


Рис. 4. Фазовый портрет хаотических колебаний влагозапаса суши в координатах влагозапас – ее производная

Таким образом, глобальные потепление и похолодание, а также резкие изменения концентрации диоксида углерода в атмосфере объясняются естественными природными процессами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 00-01-00743.

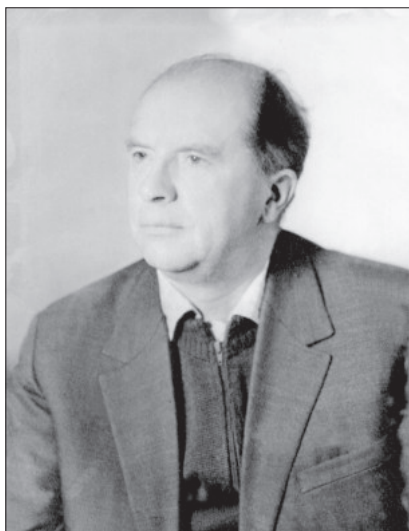
ЛИТЕРАТУРА

1. Nicolis C., Nicolis G. Nature. 1984. Vol. 311. P. 529–532.
2. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М.: Эдиториал УРСС. 2000. 240 с.
3. Найденов В.И. Вестник РАН. 2001. Т. 71. №5. С. 405–414.
4. Найденов В.И., Кожевникова И.А. Докл. РАН. 2001. Т. 378. №1. С. 51–57.
5. Найденов В.И., Швейкина В.И. Наука в России. 2000. №5. С. 42–49.
6. Найденов В.И., Швейкина В.И. Природа. 1997. №5. С. 19–30.
7. Мун Ф. Хаотические колебания. М.: Мир. 1990. 312 с.
8. Дмитриев А.С., Кислов В.Я., Спиро А.Г. Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. №12. С. 2430–2439.
9. Козлов В.В. Расщепление сепаратрис и рождение изолированных периодических решений в гамильтоновых системах с полутора степенями свободы. // УМН. 1986. Т. 41. №5. С. 177–178.
10. Довбыш С.А. Расщепление сепаратрис и рождение изолированных периодических решений в гамильтоновых системах с полутора степенями свободы. // УМН. 1989. Т. 44. №5. С. 229–230.
11. Журбенко И.Г., Кожевникова И.А. Стохастическое моделирование процессов. М.: МГУ. 1990. 147 с.

Никитин Михаил Ростиславович

(29.10.1917 – 28.8.1994)

Михаил Ростиславович Никитин – крупный учёный-гидрогеолог, ведущий специалист в области региональной гидрогеологии и гидрогеологической картографии, доктор геолого-минералогических наук. Окончил Московский Геологоразведочный институт в 1941 г. Ветеран Великой Отечественной войны, служил в составе военно-геологических отрядов 1-го Прибалтийского фронта, награждён Орденом Красной Звезды, медалью «За победу над Германией».



После войны Михаил Ростиславович работал в тресте «Спецгео» (ПГО «Гидроспецгеология») на геолого-гидрогеологических съёмках различных районов нашей страны. В 1948 г. на полевых работах в Азербайджане он тяжело заболел, у него были парализованы ноги. Несмотря на инвалидность, продолжал работу как полевой гидрогеолог в ЦЧО, Западном Казахстане, на Каме, в Курской области и Поволжье, где он принимал участие в гидрогеологических работах, связанных со строительством Волжской ГЭС. По этим материалам в 1961 г. защитил кандидатскую диссертацию: «Вопросы исследования подпора подземных вод на примерах Куйбышевского и Сталинградского водохранилищ».

После защиты диссертации М.Р. Никитин работал во ВСЕГИНГЕО, где занимался изучением ресурсов подземных вод, методикой составления гидрогеологических карт, входил в состав редколлегий и авторов монографии «Гидрогеология СССР» и Гидрогеологической карты СССР масштаба 1:2 500 000, изданных в 1970-е гг. и до сих пор являющихся не устаревшими капитальными сводными работами по гидрогеологии России и Ближнего Зарубежья. Работу во ВСЕГИНГЕО он совмещал с преподаванием во МГРИ.

В 1974 г. Михаил Ростиславович защитил докторскую диссертацию на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук по теме «Ресурсы подземных вод повышенной минерализации на территории СССР и перспективы их использования для водоснабжения». Проблемой региональной оценки и использования ресурсов солоноватых и солёных подземных вод Михаил Ростиславович занимался с 1965 г. в связи со значительным дефицитом пресных подземных вод в ряде районов страны. Эти исследования он продолжил в Институте водных проблем АН СССР, куда он перешёл на работу в 1969 г. Под его руководством составлены карты распространения и условий залегания подземных вод повышенной минерализации для территории СССР и более детальные карты для южных районов страны. Работы М.Р. Никитина оказались весьма актуальными для Казахстана и республик Средней Азии, где с 1980-х гг. происходил ввод крупных опреснительных станций в гг. Красноводске и Шевченко и многочисленных установок для опреснения воды. В 1978 г. им была опубликована книга «Ресурсы солоноватых и солёных подземных вод СССР». Помимо этого в последние годы он занимался проблемами влияния Волжских водохранилищ на изменение гидрогеологических условий прилегающих территорий после нескольких десятилетий их эксплуатации. По этим материалам в 1983 г. им была опубликована монография «Оценка влияния водохранилищ на гидрогеологические условия»

М.Р. Никитин был блестящим учёным и педагогом, автором более 60 научных работ, прекрасным отзывчивым человеком.

Р.Г. Джамалов (ИВП РАН)

Солоноватые и соленые подземные воды как составляющая общих водных ресурсов Советского Союза и задачи их изучения¹

М.Р. Никитин

Проблемы водных ресурсов Земного шара привлекают сейчас внимание широкого круга специалистов. В этих проблемах первоочередной практический вопрос – обеспечение кондиционной водой возрастающих потребностей населения, промышленности, сельского хозяйства, что во многих районах мира оказывается весьма трудной задачей. Роль подземных вод в решении этой проблемы бесспорна. Известно, что они служат прямым источником не только коммунального и промышленного водоснабжения, обводнения и орошения сельскохозяйственных земель, но и для промышленного извлечения ряда полезных компонентов, получения тепла и электроэнергии, а также и как эффективный лечебный фактор.

Издавна наибольший интерес исследователей вызывала зона интенсивного водообмена, или гидрогеохимическая зона пресных гидрокарбонатных вод. В последнее время много внимания уделяется также и зоне весьма затрудненного водообмена, или зоне хлоридных рассолов, залегающей обычно на больших глубинах. Промежуточные же зоны с солоноватыми и солеными сульфатными и хлоридными подземными водами в практическом отношении до последнего времени интересовали главным образом бальнеологов, а в теоретическом плане изучались скорее попутно и случайно, чем специально и систематически. Между тем решение основных теоретических проблем гидрогеологии возможно лишь при одинаково пристальном исследовании подземных вод всей земной коры. Поэтому подземные воды повышенной минерализации (солоноватые и соленые) требуют специального дополнительного изучения. Их образование происходит в разнообразных и часто весьма специфических условиях, но тесно связано с формированием пресных подземных вод и рассолов, представляя единый природный процесс, охватывающий всю подземную гидросферу и обусловленный суммарным воздействием на нее многих факторов: эндогенных, земных

¹ Никитин М.Р. Солоноватые и соленые подземные воды как составляющая общих водных ресурсов Советского Союза и задачи их изучения. В кн. Подземный сток и методы его исследования. М., Наука, 1972.

экзогенных и космогенных. Именно в таком плане и следует рассматривать вопросы формирования солоноватых и соленых подземных вод.

Наша страна обладает огромными ресурсами пресных вод, во много раз превышающими общую потребность в воде населения, промышленности, сельского хозяйства. Весьма велика в составе этих ресурсов и доля подземных пресных вод. Их прогнозные эксплуатационные запасы, весьма приблизительно оцененные почти для 50% площади СССР (Карта модулей..., 1965), достигают 6–7 тыс. м³/сек. Однако как поверхностные, так и подземные пресные воды распределяются по площади страны неравномерно, в связи с чем многие, часто обширные районы испытывают острый недостаток воды, пригодной для коммунального и промышленного водоснабжения, для орошения или обводнения земель. По мере увеличения населения, роста промышленности, развития орошаемого земледелия и животноводства число и площади районов, не обеспеченных пресной водой, существенно возрастают. К традиционно маловодным районам Средней Азии и Казахстана присоединяются сейчас Южный Алтай, Донбасс, Криворожье и др. Не обеспечены в достаточной степени пресными подземными водами и некоторые северные и северо-западные районы страны.

Дефицит пресных вод в таких районах может быть покрыт либо переброской пресной воды из районов, где она имеется в избытке, либо путем опреснения местных соленых или солоноватых вод. Предпочтительность того или иного из этих вариантов водоснабжения или иногда их комбинации (например, опреснение морской воды и транспортировка ее на некоторое расстояние) устанавливаются по экономическим соображениям (см., например, Клячко, 1963, 1966; Колычев, 1965; Никитин, 1967, 1968; Чуркин, Клячко, 1965). Укажем, что опреснение местных соленых или солоноватых вод выгоднее экономически, чем прокладка каналов или водоводов при расстоянии до источника пресных вод более 200–400 км, а в случае малого водопотребления и при меньшем расстоянии.

Большинство действующих сейчас на Земном шаре крупных опреснительных установок (всего их около 100) перерабатывает океаническую воду, соленость которой составляет в среднем 35 г/л. Для нашей страны, несмотря на большую протяженность ее морских

границ, необходимость опреснения океанической воды возникает относительно редко, так как основная часть побережий открытых морей обеспечена пресными водами или не освоена хозяйственно. Значительно больший практический интерес представляет искусственное обессоливание воды внутренних морей (Каспийского, Азовского, Аральского и др.), некоторых солоноватоводных рек (Эмбы, Тобола, Уила, низовьев Чу и др.) и в особенности солоноватых и соленых подземных вод, ресурсы которых достаточно велики почти во всех районах с дефицитом пресных вод. При этом наиболее благоприятны для использования с опреснением подземные воды повышенной минерализации, полностью или частично отвечающие следующим условиям: 1) залегающие на доступных глубинах; 2) обеспечивающие необходимые дебиты водозаборов; 3) относительно мало минерализованные; 4) самоизливающиеся; 5) высокотемпературные.

Общая минерализация воды – основной показатель, определяющий возможность того или иного пути ее использования и в случае необходимости – выбор метода опреснения (Клячко, 1963; Чурин, Клячко, 1965). С этих позиций удобна следующая классификация подземных вод повышенной (1–35 г/л) и высокой (более 35 г/л) минерализации по степени их солености (Никитин, 1967).

- От 1 до 3 г/л – слабосоленые воды; предельно допустимые для питья при полном отсутствии пресных вод, пригодные для водопоя скота и орошения. Наиболее целесообразные методы опреснения – химические (ионный обмен).
- От 3 до 5 г/л – среднесоленые воды; предельно допустимые для орошения при хороших условиях дренажа, пригодные для водопоя скота. Целесообразные методы опреснения – химический и электрохимический (электродиализ).
- От 5 до 10 г/л – сильносоленые воды; пригодны для водопоя скота в осенне-зимний период. Целесообразные методы опреснения – электрохимический и замораживание.
- От 10 до 15 г/л – слабосоленые воды; предельно допустимые для водопоя скота в осенне-зимний период. Целесообразные методы опреснения – дистилляция и замораживание. Выбор метода зависит от проектной производительности установки.

- От 15 до 35 г/л – сильносоленые воды; использование возможно только с опреснением, целесообразные методы которого – дистилляция и замораживание.
- Более 35 г/л – рассолы; использование возможно только с опреснением (дистилляцией или замораживанием), которое экономически не всегда целесообразно.

Для обоснования мероприятий по широкому использованию соленых и солоноватых подземных вод в народном хозяйстве необходима постановка соответствующих исследований, в первую очередь гидрогеологических.

Отметим, что в США, где ряд районов, прежде всего на засушливом Западе, испытывает острый недостаток пресных вод, такие исследования ведутся весьма интенсивно. Выделенные конгрессом на эти исследования ассигнования достигают 200 млн долл. (Клячко, 1966). В США составлен ряд региональных обзоров ресурсов соленых вод: первый (для Техаса) опубликован в 1956 г. (Winslon, Kister, 1956), а уже в 1957 г. вышел в свет «Предварительный обзор ресурсов соленых вод Соединенных Штатов», вторая часть которого целиком посвящена соленым и солоноватым подземным водам (Kriger, Hatchett, 1957).

В Советском Союзе осуществляются комплексные работы по технике и экономике опреснения воды и имеются многочисленные публикации по этим вопросам. Однако специальных гидрогеологических исследований до последнего времени не было, хотя аспекты этой проблемы затрагивались Г.В. Богомоловым (1960), Б.Н. Голубковым и др. (1964). Первой сводкой по прогнозным эксплуатационным ресурсам соленых и солоноватых подземных вод южных районов СССР явилась весьма схематическая карта, составленная в 1965 г. во ВСЕГИНГЕО под руководством А.А. Маккавеева и Е.А. Зубровой. В 1966–67 гг. институтами ВСЕГИНГЕО (Никитин, Буслаева, Герасимова, Федотова, Шахнова) и ГИДРОИНГЕО (Султанходжаев, Сабиров) были систематизированы данные о распространении и использовании соленых и солоноватых подземных вод на территории СССР, разработана методика их картирования, составлены обзорные карты с прогнозной оценкой эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации (Никитин, 1967, 1968).

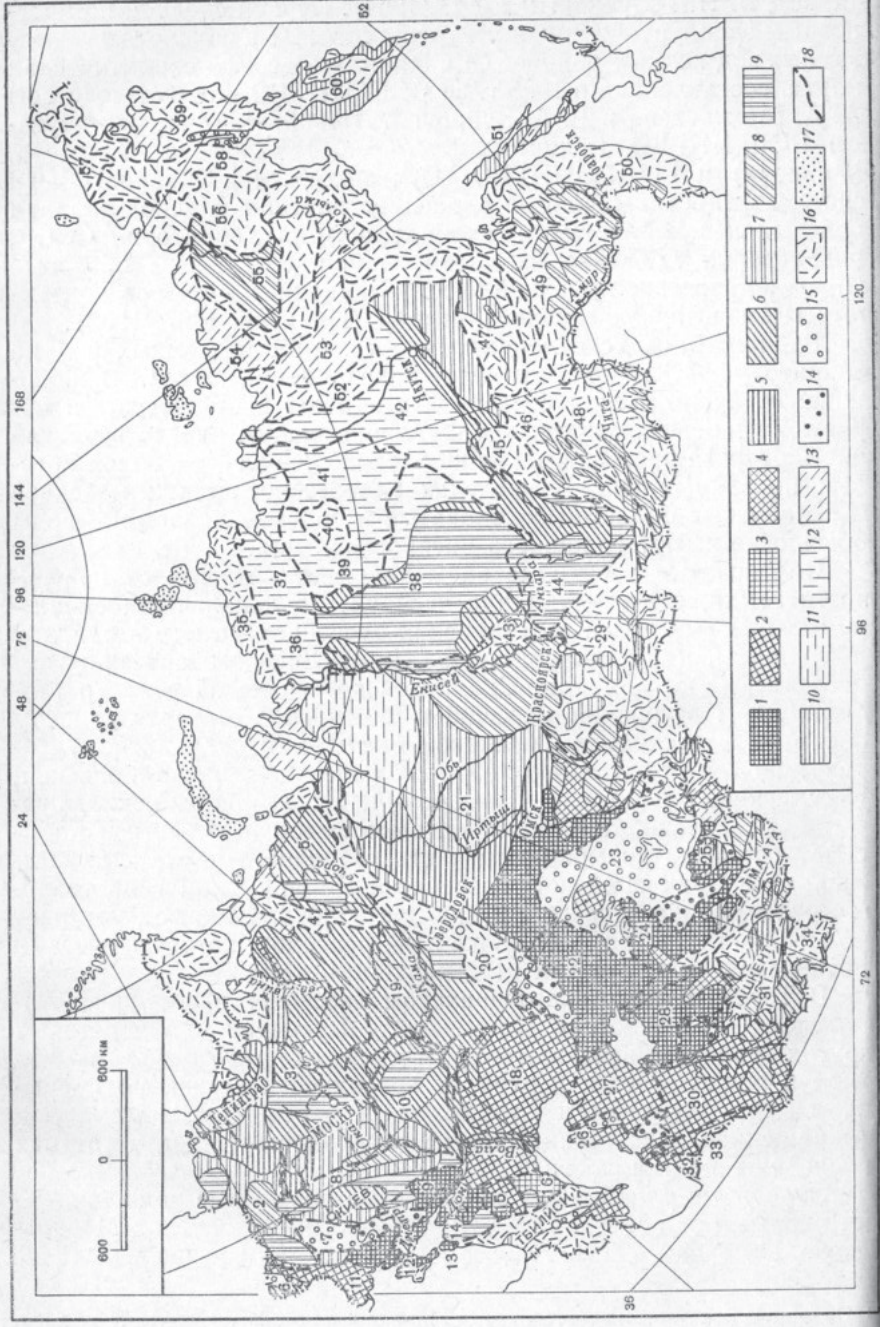
Распространение солоноватых и соленых подземных вод на территории СССР схематически показано на карте 1. В большинстве артезианских бассейнов эти воды присутствуют и образуют гидрогеохимическую зону, занимающую иногда верхнюю часть разреза бассейна, но чаще расположенную под зоной пресных подземных вод. В пределах гидрогеологических массивов и складчатых областей солоноватые и соленые подземные воды обычно не имеют сплошного распространения.

Солоноватые и соленые воды залегают первыми от поверхности земли, повсеместно или чередуясь с локальными скоплениями пресных вод в артезианских бассейнах на юге Молдавии и Украины, в Предкавказье, в Прикаспийском артезианском бассейне, на юге Западно-Сибирской артезианской области (Тобольский, Иртышский бассейны), в Тургайском артезианском бассейне, в бассейнах Туранской плиты – Сырдарьинском, Каракумском и др. При этом в таких бассейнах, как Тобольский, Иртышский, Тургайский, Чусарьсуйский, Сырдарьинский, преобладают солоноватые воды,

Карта распространения и условий залегания солоноватых и соленых подземных вод на территории СССР. (Составлена А.А. Булаевой и М.Р. Никитиным с использованием материалов И.К. Зайцева и др., ВСЕГЕИ.)

Артезианские бассейны:

1 – залегают первыми от поверхности земли повсеместно, иногда чередуясь с рассолами или локальными скоплениями (линзами) пресных вод и обычно преобладают в вертикальном разрезе бассейна; 2 – то же, но уступают по мощности залегающим ниже рассолам; 3 – распространены первыми от поверхности земли и преобладают в вертикальном разрезе бассейна, но разделяются или подстилаются горизонтами пресных вод (обращенная гидрогеохимическая зональность); 4 – распространены первыми от поверхности земли, но уступают по мощности залегающим ниже пресным водам; 5 – залегают на глубине преимущественно до 100–200 м, ниже зоны пресных вод и преобладают в вертикальном разрезе бассейна; 6 – то же, но уступают по мощности залегающим ниже рассолам; 7 – залегают на глубине преимущественно от 100–200 до 500 м, ниже зоны пресных вод и преобладают в вертикальном разрезе бассейна; 8 – то же, но уступают по мощности залегающим выше пресным водам; 9 – то же, но уступают по мощности залегающим ниже рассолам; 10 – залегают на глубине более 500 м, ниже зоны пресных вод, или отсутствуют; 11 – залегают (чаще по предположению) ниже зоны многолетнемерзлых пород и, вероятно, преобладают в вертикальном разрезе бассейна; 12 – то же, но, вероятно, уступают по мощности залегающим ниже рассолам; 13 – распространены (по предположению) «на неустановленной глубине, ниже зоны пресных вод или многолетнемерзлых пород. Гидрогеологические массивы и складчатые области: 14 – залегают первыми от поверхности земли повсеместно (пресные воды образуют лишь локальные скопления); 15 – распространены первыми от поверхности земли, но чередуются с пресными водами; 16 – практически отсутствуют (распространены лишь локально или на больших глубинах); 17 – территории, не изученные в гидрогеологическом отношении; 18 – границы и номера гидрогеологических районов (на карте показаны гидрогеологические районы в соответствии с районированием, принятым в сводном томе монографии «Гидрогеология СССР»).



которые вместе с солеными насыщают большую по мощности часть осадочного чехла этих бассейнов. В Прикаспийском бассейне и Каракумском гидрогеологическом районе зона соленых, реже солоноватых, вод уступает по мощности залегающей ниже зоне рассолов, которые местами распространены первыми от поверхности земли.

В Терско-Кумском артезианском бассейне, в восточных частях Сырдарьинского и Иртышского бассейнов и в некоторых других районах зона солоноватых и соленых подземных вод хотя и располагается первой от поверхности земли, но прерывается или подстилается горизонтами пресных подземных вод (обращенная гидрогеохимическая зональность), иногда уступая последним по мощности.

Отдельные районы, где солоноватые подземные воды залегают первыми от поверхности земли, известны в пределах Московского, Печорского, Тунгусского артезианских бассейнов.

Однако на большей части площади артезианских бассейнов Русской платформы (Прибалтийско-Польско-Украинский, Московский, Печорский, Волго-Камский и Предуральский, Ульяновско-Саратовский, Днепрово-Донецкий), в значительной части Западно-Сибирской артезианской области и артезианских бассейнов Сибирской платформы солоноватые и соленые подземные воды залегают ниже зоны пресных вод, на глубинах от 50–100 до 500 м и более. При этом в Западно-Сибирской артезианской области зона солоноватых и соленых подземных вод занимает преобладающую часть разреза осадочного чехла. В артезианских бассейнах Русской и Сибирской платформ эта зона преимущественно уступает по мощности нижележащей зоне рассолов, а иногда и расположенной выше зоне пресных вод.

На обширных пространствах севера и северо-востока Сибири солоноватые и соленые воды залегают (иногда лишь предположительно) непосредственно под толщей многолетнемерзлых пород; вероятно, в разрезе осадочного чехла на севере Западно-Сибирской артезианской области они преобладают и уступают по мощности зоне рассолов в артезианских бассейнах Сибирской платформы.

Гидрогеологические массивы и складчатые области обычно характеризуются отсутствием выдержанной зоны солоноватых и соленых подземных вод. Однако в Центрально-Казахстанской и Чу-

Илийской гидрогеологических областях, в южном окончании Уральской области, в юго-восточной части Украинского кристаллического щита и в некоторых других районах солоноватые и соленые подземные воды залегают первыми от дневной поверхности, повсеместно или чередуясь с пресными водами. В большинстве других складчатых районов солоноватые и соленые подземные воды приурочены к зонам разрывных тектонических нарушений, образуя связанные с ними месторождения лечебных минеральных вод, а также распространены в межгорных артезианских бассейнах. При этом в таких артезианских бассейнах, как Куринский (Кавказ) или малые бассейны Центрально-Казахстанской области (Тенгиз-Кургальджинский и др.), солоноватые и соленые подземные воды залегают первыми от поверхности и подстилаются мощной зоной рассолов. В межгорных бассейнах Средней Азии солоноватые и соленые подземные воды обычно распространены ниже зоны пресных вод. В центральных частях этих бассейнов они иногда залегают первыми от поверхности, но вниз по разрезу сменяются пресными водами (Ферганский артезианский бассейн). В большинстве межгорных артезианских бассейнов Забайкалья и Дальнего Востока соленых вод нет, а солоноватые подземные воды залегают на большой глубине, ниже мощной зоны пресных вод.

Прогнозные эксплуатационные ресурсы соленых и солоноватых (преимущественно с минерализацией от 3 до 35 г/л) подземных вод, ориентировочная оценка которых произведена для южных (аридных и полуаридных) районов СССР, общей площадью около 3,3 млн км², в сумме составляют величину порядка 700–1100 м³/сек, что соответствует среднему модулю эксплуатационных ресурсов 0,2–0,3 л/сек*км².

Полученная величина не превышает 10–15% от приведенной выше суммы прогнозных эксплуатационных ресурсов пресных подземных вод СССР. Однако если сопоставить эту величину с прогнозными эксплуатационными ресурсами пресных и слабосоленых (до 3 г/л) подземных вод, суммированных для приведенных районов, то они окажутся примерно равны. Таким образом, широкое применение искусственного опреснения позволит по крайней мере удвоить на рассматриваемой территории общие ресурсы подземных вод, пригодных для водоснабжения.

Практическое значение соленых и солоноватых подземных вод, конечно, неодинаково в различных районах. Так, на территории Прикаспийского артезианского бассейна, в Мангышлак-Устюртском и Каракумском гидрогеологических районах (рисунок) эти воды могут быть основным, а иногда – и единственным подземным источником водоснабжения, орошения, обводнения пастбищ. Ресурсы основных горизонтов соленых и сильносоленых вод превышают ресурсы пресных и слабосоленых подземных вод в первом районе почти в 1,5 раза, во втором – в 3–5 раз, а в третьем – даже в 20–25 раз. При использовании с опреснением подземных вод, соленость которых, превышает 35 г/л (при оценке ресурсов не учтены), резервы для расширения водоснабжения в этих районах значительно возрастают. В ряде случаев здесь возможно сооружение довольно мощных групповых водозаборов, что позволит иногда удовлетворять за счет опресненных подземных вод нужды крупных населенных пунктов до городов включительно. Использование же подземных вод с опреснением для мелкого рассредоточенного водоснабжения при помощи одиночных скважин возможно в этих районах повсеместно.

В ряде других районов соленые и солоноватые воды могут послужить дополнительным источником водоснабжения. К ним относятся: Донбасс, где соленые и солоноватые подземные воды превосходят по эксплуатационным ресурсам пресные; районы Степного Крыма, Причерноморский и Тургайский артезианские бассейны, где ресурсы подземных вод, непосредственно пригодных для водоснабжения, и вод, требующих искусственного опреснения, примерно равны: Сырдарьинский, Чу-Сарысуйский артезианские бассейны и Центрально-Казахстанская гидрогеологическая складчатая область, где воды, нуждающиеся при использовании в опреснении, составляют 25–30% общих эксплуатационных ресурсов подземных вод.

Целесообразность использования с опреснением подземные вод повышенной минерализации в конкретных случаях определяется на основании экономического сопоставления этого и других возможных вариантов водоснабжения (переброска пресных вод из соседних районов, использование с опреснением соленых поверхностных вод, магазинирования вод временного поверхностного стока). В ряде случаев этот вопрос может быть решен однозначно уже на основании элементарных расчетов (Никитин, 1967)

В ближайшей перспективе представляется наиболее рациональным широкое использование опресняемых подземных вод для мелкого (распредоточенного) водоснабжения в сельском хозяйстве, особенно для отгонного животноводства, что уже и осуществляется в небольших масштабах в некоторых районах Казахстана и Средней Азии. Достаточным гидрогеологическим обоснованием для такого использования соленых и солоноватых подземных вод могут служить материалы среднемасштабных гидрогеологических съемок.

В отдельных случаях конкретный экономический анализ может указать на целесообразность эксплуатации соленых или солоноватых подземных вод групповыми водозаборами для обеспечения (с применением опреснителей) нужд относительно крупных водопотребителей. В этих случаях потребуется постановка соответствующих разведочных работ.

Приведенная здесь прогнозная оценка региональных эксплуатационных ресурсов подземных вод повышенной минерализации выполнена очень приближенно. Перспективное планирование мероприятий по использованию соленых и солоноватых подземных вод, проектирование поисковых и разведочных работ на эти воды нуждаются для обоснования в дальнейшем, более остальном обобщении существующих гидрогеологических данных. Первоочередными исследованиями в этом направлении являются начатые в 1967 г. рядом организаций Министерства геологии СССР работы по прогнозной оценке эксплуатационных ресурсов соленых и солоноватых подземных вод с составлением комплекта мелкомасштабных карт районов, где использование таких вод наиболее актуально (Никитин, 1967).

Следует подчеркнуть, что проблема использования с искусственным опреснением подземных вод повышенной минерализации представляется достаточно сложной и должна рассматриваться шире, чем это пока делается. Она входит составной частью в более общую проблему комплексного использования, охраны и восполнения водных ресурсов страны, а также и ее природных ресурсов в целом. Так, извлечение из недр земли соленых вод в больших объемах и последующее частичное их возвращение в недра в опресненном виде (возвратные воды, потери при орошении и т.п.), региональное снижение уровня соленых грунтовых вод в результате их интен-

сивной эксплуатации – все это может привести к существенным положительным изменениям водного и солевого баланса значительных территорий, к общей трансформации ландшафта, и должно заблаговременно прогнозироваться.

Серьезного внимания заслуживают вопросы и комплексного использования собственно соленых и солоноватых подземных вод. В ряде случаев эти воды одновременно могут быть использованы для водоснабжения и для извлечения некоторых ценных химических продуктов. Термальные соленые воды могут служить и как средство теплофикации. Экономически целесообразным может быть использование с опреснением соленых вод, откачиваемых при вертикальном дренаже орошаемых земель, или соленых вод, получаемых попутно при эксплуатации крупных линз пресных вод (Туркмения и другие районы). При выборе водоносных горизонтов для закачки промстоков необходимо прежде всего определить, не возникнет ли необходимость использовать воды этих горизонтов для водоснабжения с опреснением. Планируя эти и другие подобные мероприятия на одних и тех же или соседних площадях, нужно рассматривать их в комплексе и оценивать их взаимовлияние и суммарное воздействие на природную обстановку района.

Образование вод повышенной минерализации – важное звено в общей цепи процессов, формирующих подземную гидросферу в целом. Таким образом, изучение соленых и солоноватых вод необходимо также для познания и объяснения закономерностей образования и распространения пресных подземных вод и рассолов. Оно важно и для оценки ресурсов всех типов вод, выяснения возможностей их восполнения, прогноза взаимовлияния при эксплуатации.

Общее изучение подземных вод повышенной минерализации на территории СССР должно охватить следующие вопросы:

- 1) распространение различных по степени солености вод артезианских бассейнов и складчатых областей, формы и условия их залегания;
- 2) коллектора солоноватых и соленых вод, их строение, состав пород, фильтрационные свойства, мощности водопроницаемости;
- 3) химический и газовый состав воды, температура, закономерности их изменения во времени и пространстве;
- 4) движение подземных вод, их естественные ресурсы, питание, разгрузка, взаимосвязи с подземными водами меньшей и большей солености, с поверхностными

водами; 5) формирование соленых и солоноватых подземных вод в общей системе природных вод; 6) прогнозная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод с различными пределами повышенной минерализации, перспективы и пути их комплексного использования; 7) прогноз влияния эксплуатации подземных вод повышенной минерализации в комплексе с другими факторами на водный и солевой баланс территории и ее природную обстановку в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолов Г.В. Водные ресурсы главнейших районов Средней Азии и РСФСР и возможность дополнительного их увеличения. – В сб.: Обесоложивание и опреснение соленых и солоноватых вод. М., ВОДГЕО, 1960
2. Голубков Б.Н., Фёдоров К.В., Фролов П.М. Получение пресной воды с использованием термальных вод. – В сб.: Методы изучения и использования водных ресурсов. М., «Наука», 1964.
3. Карта модулей эксплуатационных ресурсов пресных и солоноватых подземных вод СССР. Масштаб 1:5 000 000. М., 1965.
4. Клячко В.А. Современные методы опреснения воды. – Изв. Акад. строит. и архитект. СССР, 1963, №3.
5. Клячко В.А. Международный семинар по опреснению воды. – Атомная энергия, 1966, Т. 21, вып. 2.
6. Кольчев В.С. Атом утоляет жажду. М., 1965.
7. Никитин М.Р. Методические указания по составлению карт основных горизонтов подземных вод повышенной минерализации. ВСЕГИНГЕО, №76. М., 1967.
8. Никитин М.Р. Перспективы и пути практического использования соленых и солоноватых подземных вод. ВСЕГИНГЕО. Тематический сборник. Вып. II, №102. М., 1968.
9. Чурин А.В., Клячко В.А. Современное состояние проблемы опреснения воды, – Вестн. АН СССР, 1965, №6.
10. Kriger R.A., Hatchett J.I. Preliminary survey of salinwater resources of the United States. U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper №1374. Washington,
11. Winston A.G., Kister S.R. Saline-water resources of Texas. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper, №1365, Washington, 1956.

Панин Геннадий Николаевич

(19.11.1944 – 17.2.2015)

Геннадий Николаевич Панин – крупный учёный, известный специалист в области исследований пространственно-временных закономерностей гидрологических и гидрофизических процессов, моделирования процессов тепло-массообмена в прибрежной зоне водоёмов, взаимодействия вод суши с атмосферой; доктор географических наук, профессор.



Г.Н. Панин родился 19 ноября 1944 г. в г. Гусь-Хрустальный Владимирской области. После окончания средней школы в 1962 г. поступил на географический факультет Московского государственного университета им М.В. Ломоносова, который окончил в 1967 г. по специальности океанология.

В 1967–69 гг. – инженер, младший научный сотрудник Государственного океанографического института Госкомгидромета СССР; в 1969–72 гг. аспирант Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР (ИО АН СССР).

После окончания аспирантуры работал в должности младшего научного сотрудника ИО АН СССР (1972–76 гг.); в 1976 г. перешёл на работу в Институт водных проблем АН СССР (позднее ИВП РАН). Вся дальнейшая научная деятельность Геннадия Николаевича до последних дней жизни была связана с Институтом, он прошёл путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией взаимодействия вод суши с атмосферой.

Г.Н. Панин внёс существенный вклад в изучение пространственно-временных закономерностей процессов энерго-массопереноса в пограничных зонах водоёмов, поверхности суши и атмосферы. Им

создано новое научное направление – моделирование взаимодействия вод суши с атмосферой, которое существенно расширило возможности гидрологического и климатического прогнозирования. Г.Н. Паниным разработаны модели и методики расчётов испарения мелководных и глубоководных водоёмов разной солёности, учитывающие влияние на эти процессы деятельности человека и климатических изменений в разных физико-географических условиях. Его теоретические и экспериментальные результаты исследования испарения с поверхности Каспийского моря стали всемирно известными.

Широко известны также результаты исследований Г.Н. Паниным водного баланса Каспийского моря, позволяющие выявить причины и дать прогноз изменений уровня моря, что имеет большое теоретическое и практическое значение. Им разработаны оригинальные модели тепло-влажнообмена между неоднородной подстилающей поверхностью суши и атмосферой, объясняющие дисбаланс между потоком приходящей к подстилающей поверхности энергии и суммой турбулентных потоков явной и скрытой теплоты. Новые параметрические модели, разработанные Г.Н. Паниным, позволяют осуществлять более адекватное сопряжение гидрологических и климатических моделей формирования теплового и водного режимов системы «суша – атмосфера».

Значительное внимание в работах Г.Н. Панина уделено исследованиям современных климатических изменений глобального и регионального масштабов; а также оценке влияния тепло-газообмена на водной поверхности на гидробиологическое состояние водоёма и развитие заморных явлений.

В последние годы под руководством Г.Н. Панина выполнен цикл работ, связанных с оценкой характеристик климата Арктики и Северной Атлантики в 20 в. и прогнозированием их изменений в 21 в.

Результаты фундаментальных научных исследований Г.Н. Панина широко известны в нашей стране и за рубежом, им опубликовано свыше 160 научных работ, в том числе 7 монографий. Его модели используют учёные России, Германии, Польши, Нидерландов, США, Испании и Японии. В 1995–97 гг. вёл исследовательскую работу в университетах Саксонии и Баварии (ФРГ).

В числе наиболее значимых научных публикаций можно отметить монографии: Панин Г.Н. Тепло и массообмен между водоёмом

и атмосферой в естественных условиях. М.: Наука, 1985. 206 с.; Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: НАУКА, 1987. 89 с.; Кривитский С.В., Панин Г.Н. Аэродинамическая шероховатость поверхности водоёма. М.: Наука, 1992. 134 с.; Панин Г.Н. (соавторы Дзюба А.В., Диваков И.В. и др.) Взаимодействие вод суши и атмосферы. М.: Наука 1993 г. 14 п.л.; Panin G.N. Interaction between land-water surface and the atmosphere under inhomogeneous conditions; Изд. Лейпцигский университет (курс лекций), 1996. 10,0 п.л.; Panin G.N., Berngen M., Schonfeld H., et al. Wind atlas and wave atlas for the area of Darss and Zingst; Изд. Лейпцигский университет, 1998. 10,0 п.л.; Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005. 356 с.

Г.Н. Панин в течение 5 лет вёл преподавательскую работу на кафедре метеорологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова; читал курсы лекций в Лейпцигском, Байройтском, Барселонском университетах, техническом университете Дрездена, университете штата Вашингтон, свободном университете Берлина, Российском университете Дружбы народов. Им подготовлено 6 кандидатов наук.

Г.Н. Панин выполнял большую общественно-научную работу: был членом редколлегий международных и отечественных журналов «Journal of Atmospheric and Ocean Science», «Водные ресурсы»; заместителем председателя экспертного совета ВАК по наукам о Земле; членом научного совета РАН по климату, членом экспертного совета Минобрнауки РФ, членом экспертного совета UNDP (ООН), членом научного совета Отделения наук о Земле РАН по молодым учёным, членом учёного и диссертационного советов ИВП РАН.

За плодотворную научную деятельность Г.Н. Панину было присвоено почётное звание «Заслуженный деятель науки РФ», его статьи неоднократно отмечались премиями за лучшую публикацию.

Геннадий Николаевич был талантливым учёным, интеллигентным, целеустремленным, энергичным, жизнелюбивым и благожелательным человеком. К глубокому сожалению, он скоропостижно скончался, не успев полностью реализовать свой творческий потенциал.

М.И. Степанова (ИВП РАН)

Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий¹

Г.Н. Панин и др.

Введение

Испарение и теплообмен являются основными частями водного и теплового баланса водоема. Поэтому к определению их величин исторически сложился особый интерес. Интенсивность испарения и теплообмена зависит от свойств воздушных масс, переносимых над морем, в значительной степени определяется условиями подстилающей поверхности моря. Достаточно надежным методом измерения величин испарения и теплообмена является прямой метод, основанный на непосредственном измерении турбулентных флуктуации влажности и температуры воздуха и вертикальной компоненты скорости ветра с последующим вычислением мгновенных значений вертикальных потоков [1]. Осреднение этих значений по времени дает величины потоков в точке. Для определения испарения и теплообмена определенной акватории необходимо измерять их значения во многих точках пространства, что не представляется пока технически возможным. Поэтому эта проблема решается методом параметризации турбулентных потоков [2, 3] с последующим установлением эмпирических соотношений.

В настоящее время для определения величин испаряющейся воды и теплообмена используются разнообразные методы, среди которых можно выделить два основных класса: 1) основанные на использовании уравнений водного и теплового баланса моря, 2) основанные на использовании различного рода эмпирических и полуэмпирических соотношений.

Балансовые методы, как известно, дают интегральную величину видимого испарения всего водоема и его теплообмена. Часто именно интегральная величина необходима при проведении водохозяйственных расчетов, поэтому балансовые методы наиболее распространены. В то же время следует иметь в виду, что возможности балансовых методов определения локального испарения и теплообмена ограничены предположением пространственной однородно-

¹ Панин Г.Н., Насонов А.Е., Фокен Т. Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006, том 42, №3. С. 1–17.

сти этой характеристики, которая в большинстве случаев не выполняется.

Кроме этого основного недостатка балансового метода понятно, что значения испарения и теплообмена определяется косвенно – как замыкающий член в уравнении водного и теплового баланса. При таком определении испарения и теплообмена ошибки членов уравнения будут ошибками искомых величин.

Методы второго типа указанной градации отличает одно важное преимущество: они позволяют получить значения истинного, а не видимого испарения. Наряду с этим методы второго типа дают представление о пространственном изменении величины испарения и теплообмена, изучить их региональные особенности. В итоге интегрирование величин испарения и теплообмена по площади должно дать информацию о результирующем (интегральном) испарении и теплообмене. Недостатком этого метода является использование для расчетов испарения и теплообмена простых полуэмпирических соотношений, не учитывающих сложную природу процесса взаимодействия моря с атмосферой. В частности, до настоящего времени оценки величин испарения и теплообмена производятся без учета глубины водоема. Однако очевидно, что мелководные акватории, например, должны испаряться быстрее, чем глубоководные.

Проведенные ранее исследования [4] показали, что современные изменения уровня Каспийского моря только на 90% объясняются соответствующими изменениями составляющих водного баланса. Может быть много причин, вызывающих указанный дисбаланс, но мы предположили, что наиболее вероятно он вызван недостаточно правильным определением испарения с мелководного Северного Каспия. Проведенный нами обзор методов расчета значений испарения, а также тепло и энергообмена показал, что в современных моделях тепло-массообмена между водоемами и атмосферой не учитываются особенности мелкомасштабного взаимодействия мелководий с атмосферой. Дело в том, что волны в мелководных акваториях более круглые, чем в открытых и глубоководных частях морях и раньше (при более низких скоростях ветра) обрушаются. Все это должно приводить к усилению шероховатости водной поверхности в аэродинамическом смысле и соответственно к более интенсивно-

му турбулентному обмену импульсом, теплом и влагой. Возможно именно с этим связано, что Кара-Богаз-Гол после перекрытия стока из Каспия в 1980 г. высох почти в 2 раза быстрее, чем предполагалось. Проведенный обзор показал также, что на сегодняшний день вообще нет какого-либо надежного метода определения испарения и теплообмена мелководных озер и прибрежной зоны морей. Все это определило новое направление исследований Лаборатории взаимодействия вод суши с атмосферой Института водных проблем РАН, связанное с развитием представлений о природе взаимодействия мелководного водоема с атмосферой. Исследования проводились как экспериментально, так и теоретически.

Анализ результатов измерения поверхностных потоков импульса, тепла и влаги на мелководном Северном Каспии

Основной экспериментальный материал был получен на мелководном Северном Каспии. В период с 1990 г. по 1992 г. на Северном Каспии было проведено три экспедиции с борта НИС «Акватория». Основная задача экспериментальных исследований состояла в измерении турбулентных потоков импульса, тепла, влаги, поверхностных волн и сопутствующих гидрометеорологических параметров при разных глубинах моря.

Оборудование для прямых измерений потоков тепла, влаги и количества движения, а также приборы для измерения поверхностного волнения и сопутствующих гидрометеорологических измерений были установлены на мачте и на борту НИС «Акватория» в разных точках Северного Каспия и при разных глубинах моря (от 3 до 8 м). Сигнал от приборов по кабелю передавался на НИС «Акватория», где регистрировался на компьютере и предварительно обрабатывался. Судно фиксировалось на воде при помощи якоря на расстоянии 20–25 м от мачты. Это позволяло получать данные о поверхностных потоках и сопутствующую информацию в относительно неискаженных условиях. Оборудование прошло соответствующие испытания в международных экспериментах KUREX-88 [5] и FIFE-89 [6].

Уникальная информация, полученная таким образом, использовалась далее для непосредственного анализа интенсивности испарения, теплообмена и количества движения в зависимости от глубины моря и параметров ветрового волнения. Сопутствующая гидроме-

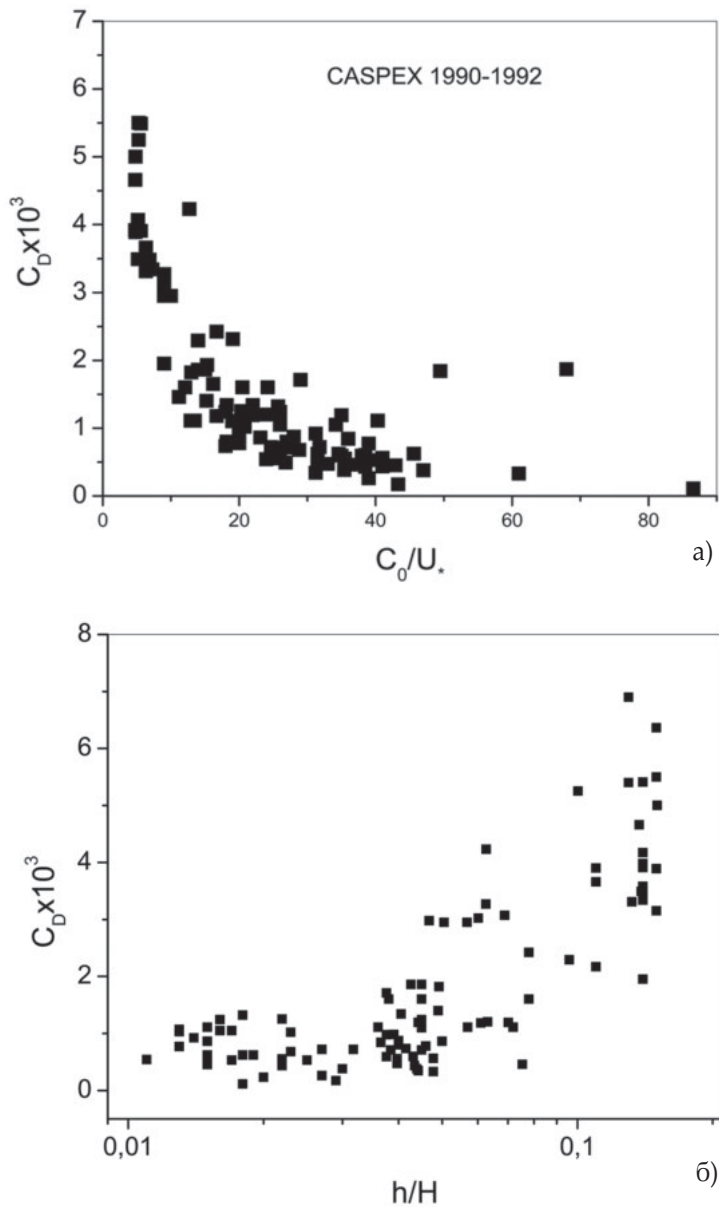
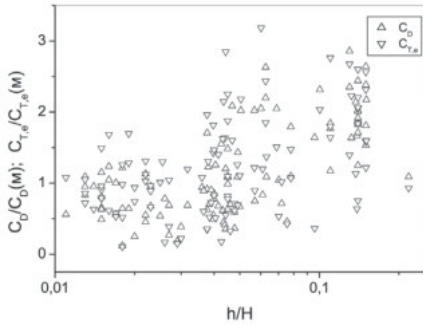
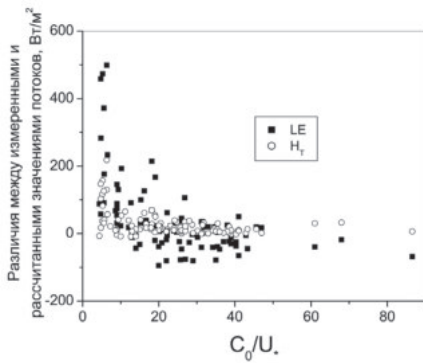


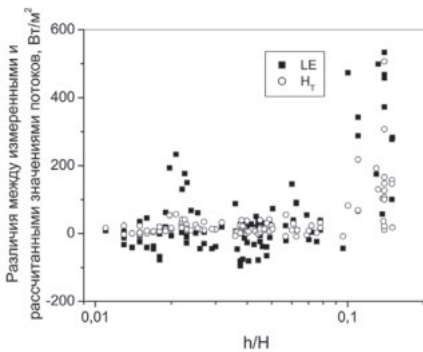
Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления водной поверхности от динамического состояния поверхностного волнения (C_0/U_*), (а) и параметра h/H , (б) по данным эксперимента КАСПЭКС 1990–1992 гг.



a)



б)



в)

Рис. 2. Зависимость отношения коэффициентов сопротивления C_D и испарения $C_{T,e}$, измеренных на мелководье, к их рассчитанным значениям $C_D(m)$ и $C_{T,e}(m)$ по модели для глубокого моря (формулы 4, 5) от параметра h/H (а), и различий между измеренными на мелководье скрытого (LEM) и явного (НТМ) потоков тепла с одной стороны и рассчитанными их значениями (ЛЕС, НТС) по модели для глубокого моря (формулы 4, 5) от динамического состояния поверхностного волнения (C_0/U_*), (б) и параметра h/H , (в)

теорологическая информация использовалось для расчета значений поверхностных потоков импульса, тепла и влаги с помощью балк-параметризации для глубокого моря [7–9, 3, 10].

Уже первые наши экспериментальные данные показали заметно более высокие значения характеристик взаимодействия по сравнению с характерными их величинами для подобных гидрометеорологических условий на глубокой воде. Зависимость коэффициента трения C_D от параметров C_0/U . (C_0 – фазовая скорость основной гармоника поверхностных волн, U – динамическая скорость ветра в приводном слое атмосферы) и h/H (h – высота поверхностных волн, H – глубина моря в точке измерения), характеризующих динамическое состояние поверхностного волнения, представлены на рис. 1а и 1б. Коэффициент трения C_D меняется почти на порядок от значений, менее чем от $1,10^{-3}$ до $6,10^{-3}$. При умеренном ветровом волнении ($C_0/U > 20$; $h/H < 0,1$) экспериментальные точки группируются вокруг значения $C_D \approx 1,10^{-3}$, характерного для глубокого моря. С усилением ветра поверхностные волны на мелкой воде начинают обрушиваться раньше, чем на глубокой воде и в результате уже при незначительном изменении параметров C_0/U и h/H трение водной поверхности резко усиливается и коэффициент трения C_D достигает значения $6,10^{-3}$ при $C_0/U \approx 10$ и $h/H \approx 0,15$ соответственно.

Особенно наглядно виден эффект усиления трения водной поверхности, а также интенсивности испарения и теплообмена мелкой воды с атмосферой по сравнению с глубокой водой на рис. 2а. Сопоставления величин измеренных и рассчитанных по балк-параметризациям (Панин, 1985) коэффициентов сопротивления и чисел Стентона (C_T) и Дальтона (C_e) при разных условиях динамического состояния поверхностного волнения (h/H) показывает более чем двукратное увеличение измеренных значений по сравнению с рассчитанными для глубокого моря.

Разница между измеренными значениями потоков тепла и влаги с одной стороны и вычисленными их значениями по балк-параметризации [2, 3, 10] при разных условиях динамического состояния поверхностного волнения (C_0/U и h/H) достигает 500 Вт/м^2 (рис. 2б и 2в). В тоже время при умеренном ветровом волнении ($C_0/U > 20$; $h/H < 0,1$) из рис. 2б и 2в видно, что модельные расчеты хорошо совпадают с измеренными значениями потоков тепла и влаги. При h/H

меньших 0,1 ($h/H < 0,1$) волны малы и не вызывают дополнительной интенсификации процессов вертикального обмена.

Очевидно, что при умеренном ветровом волнении на мелководье не происходит еще обрушение волн и в этом случае получаем ожидаемый результат – соответствие данных расчета и измерения (различия в основном не превышают 100 Вт/м^2 , и эти отличия носят случайный характер). Рисунки 2б и 2в, таким образом, наглядно иллюстрируют хорошую воспроизводимость результатов модельными расчетами (формулы 4, 5) при $h/H < 0,1$.

Теоретические обобщения и параметризация теплообмена и испарения в пограничном слое над водоемом

С помощью спектрального анализа скорости ветра, температуры и влажности воздуха, с одной стороны, и поверхностных волн глубокого водоема, с другой стороны, было показано [11, 3, 10, 12, 13, 14], что спектры температуры и влажности, как и коспектры потоков тепла и влаги, подвержены волновому влиянию значительно меньше чем спектры скорости ветра и коспектры потока количества движения. Это означает, что при описании испарения и теплообмена водоема с атмосферой условия автомодельности могут быть использованы шире, чем при описании характеристик динамического взаимодействия.

В этом случае изменение теплообмена и испарения в пограничном слое над водоемом легче описывать в виде:

$$C_{T,e} = F_{T,e}(z/h_S; z/L; h_S/\delta_v; Pr_T; Pr_e), \quad (1)$$

Если принять числа Прандтля постоянными и равными между собой ($Pr_T = Pr_e = Pr = 0,1$), а также зафиксировать высоту измерения (например, $z = 10 \text{ м}$), можно переписать (1) в виде

$$C_{T,e} = F_{T,e}(z/L; h_S/\delta_v). \quad (2)$$

Считая, что в (2) δ_v с точностью до числового множителя может быть представлено в виде $\delta_v \sim v/u_*$, а $h_S \sim z_0$, получаем

$$C_{T,e} = F_{T,e}(z/L; z_0 u_* / v). \quad (3)$$

Определению вида функции $F_{T,e}$ посвящено много публикации [15, 10, 16] здесь же приведем окончательные формулы, которые были положены в основу для расчета значений испарения и теплообмена глубокого моря.

$$E = C_{T,e}^N \rho U_Z \Delta q_{SZ} \cdot \begin{cases} \left[\text{Ar} c_p \Delta q_{SZ} \right]^{4/3} \left[\frac{\beta v_E^2 g}{v} (1 + b/Bo) \right]^{1/3} & \text{при } U_{10} < 3 \text{ м/с} \\ (1 - z/L) \left[1 + 10^{-2} (z_0 u_* / v) \right]^{3/4} & \text{при } z/L < 0 \\ \left[1 / (1 + 3,5 z/L) \right] \cdot \left[1 + 10^{-2} (z_0 u_* / v) \right]^{3/4} & \text{при } z/L > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$H_T = C_{T,e}^N \rho c_p U_Z \Delta T_{SZ} \cdot \begin{cases} \left[\text{Ar} c_p \Delta T_{SZ} \right]^{4/3} \left[\frac{\alpha v_T^2 g}{v} (1 + b/Bo) \right]^{1/3} & \text{при } U_{10} < 3 \text{ м/с} \\ (1 - z/L) \left[1 + 10^{-2} (z_0 u_* / v) \right]^{3/4} & \text{при } z/L < 0 \\ \left[1 / (1 + 3,5 z/L) \right] \cdot \left[1 + 10^{-2} (z_0 u_* / v) \right]^{3/4} & \text{при } z/L > 0 \end{cases} \quad (5)$$

В (4-5) $\alpha = -(\partial h / \partial T)_{p,q} = 1/T_z$ – коэффициент теплового расширения воздуха, $\beta = -(\partial h / \partial q)_{p,T} \approx 0,61$, v_T , v_E – кинематические коэффициенты молекулярной диффузии тепла и водяного пара в воздухе, $b = \beta c_p / \alpha \lambda \approx 0,073$ (при $T_z = 297$ К), g – ускорение свободного падения, ρ – плотность воздуха, c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Bo – отношение Боуэна ($Bo = H_T / \lambda_E$), A – коэффициент ($A = 0,15$), L – масштаб Монина-Обухова.

В итоге с использованием стандартных гидрометеорологических данных T_S , T_z , q_z , U_z , z значения испарения и теплообмена глубокого моря с атмосферой могут быть вычислены непосредственно по формулам (4), (5).

Параметризация взаимодействия мелководного моря с атмосферой

Заметим, что чувствительность испарения и теплообмена к глубине водоема были отмечены и ранее [см. обзор 10, 12, 17, 16]. Интенсификация энерго-массообмена мелкого водоема с атмосферой вызвана как изменением теплового режима воды мелководья [18, 19], так и аэродинамической шероховатости его поверхности [17, 20]. Так, если тепловые изменения при вычислениях учитываются при помощи использования фактических данных его поверхностной температуры, учет же изменений шероховатости обычно не делается.

На рисунках 2а – 2в проиллюстрировано влияние увеличения аэродинамической шероховатости поверхности мелководий на интенсификацию испарения E , теплообмена H_T и изменение коэффициентов сопротивления C_D и тепло-влагообмена $C_{T,e}$. Эти материалы, в целом, позволили представить интенсивность испарения, теплообмена и энергообмена мелководий с погрешностью приблизительно 25% от рассчитываемого значения в виде:

$$\begin{aligned}
 U_*^{SW} &= U_* + U_* \cdot k_U^{SW} \cdot \frac{h}{H} \approx U_* (1 + 1,6h/H) \\
 H_T^{SW} &= H_T + H_T \cdot k_T^{SW} \cdot \frac{h}{H} \approx H_T (1 + 2/h)H \\
 E^{SW} &= E + E \cdot k_E^{SW} \cdot \frac{h}{H} \approx E (1 + 2/h)H
 \end{aligned} \tag{6}$$

где: $k_T^{SW} \approx k_E^{SW} \approx 2,0$, $k_U^{SW} \approx 1,6$ – эмпирические коэффициенты.

В (6) h^{SW} – высота волны на мелководье, которую необходимо измерить.

Данные относительно h^{SW} часто отсутствуют, поэтому можно воспользоваться эмпирическим соотношением

$$h^{SW} \approx \frac{0,07 \cdot U_Z^2 \cdot (gH/U_Z^2)^{3/5}}{g}$$

Величина интенсификации энерго-массообмена мелководных акваторий с атмосферой, полученная на основе эмпирических формул (6) при различных скоростях ветра проиллюстрирована на рис. 3а и 3б.

Эффекты прибрежной мелководной зоны

Следует иметь в виду, что в прибрежной зоне воздушный поток трансформирован [12, 16], и это приводит к дополнительным трудностям вычисления энерго-массообмена там. Имеются многочисленные экспериментальные и теоретические исследования для этой зоны [21], включая полное изучение структуры внутреннего пограничного слоя (IBL). Однако, по-прежнему, количественные оценки величин турбулентных потоков в этой зоне сильно отличаются между различными авторами [20], достигая 100 %.

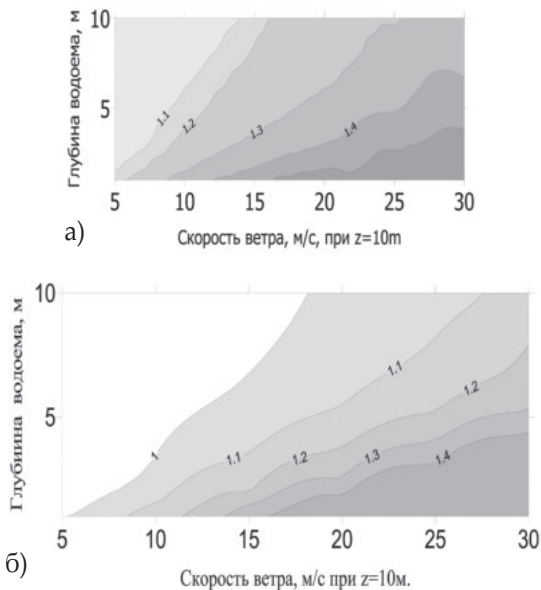


Рис. 3. Коэффициент интенсификации испарения и теплообмена водной поверхности с атмосферой (а) и динамической скорости ветра (б) при различной скорости ветра на высоте $z=10$ м и при разной глубине водоема

Базируясь на собственных экспериментальных данных по влиянию глубины водоема на интенсивность взаимодействия, нами была разработана модель энерго- и массообмена в прибрежной зоне.

Используется понятие зоны прибойа ($x \leq L^{(-)}$), где выполняются условия ($h^{(-)}(x) = H^{(-)}(x) \cdot f(\text{tg}\alpha) \approx 0,5H^{(-)}(x)$).

На границе прибрежной зоны принято возможным использование дисперсионных соотношений как для глубокого моря ($C_0 = g/\omega$), так и для мелкого моря ($C_0 = \sqrt{gH}$). С учетом этого на границе при-

брежной зоны можно записывать: $\frac{\lambda^{(+)}}{H^{(+)}} = 2\pi \approx 6,28$.

Запишем уравнение энергетического баланса в прибрежной зоне при ($\frac{\lambda^{(+)}}{H^{(+)}} = 2\pi \approx 6,28$) в виде:

$$\frac{\partial h^2}{\partial x} = \frac{h^{(+)^2}{L^{(+)}}}{L^{(+)}} F(\text{tg}\alpha). \quad (7)$$

Найдем значение функции: $F(\text{tg}\alpha)$:

$$\int_{L^{(+)}}^x \frac{\partial h^2}{\partial x} dx = \frac{h^{(+2)}}{L^{(+)}} \int_{L^{(+)}}^x F(\operatorname{tg} \alpha) dx. \quad (8)$$

После интегрирования получаем:

$$h^2(x) = h^{(+2)} - h^{(+2)} \cdot \frac{(L^{(+)} - x)}{L^{(+)}} F(\operatorname{tg} \alpha). \quad (9)$$

При $x=L^{(-)}$ получаем:

$$h^{(-)} = 0,5 \cdot H^{(-)} = 0,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot L^{(-)}. \quad (10)$$

Перепишем (9) в виде:

$$h^{(-2)} = h^{(+2)} - h^{(+2)} \cdot \left(\frac{L^{(+)} - L^{(-)}}{L^{(+)}} \right) F(\operatorname{tg} \alpha) = (0,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2 \cdot L^{(-2)}. \quad (11)$$

Примем $F(\operatorname{tg} \alpha) = c$, тогда:

$$h^{(-2)} = h^{(+2)} \cdot \left[1 - c \cdot \left(1 - \frac{L^{(-)}}{L^{(+)}} \right) \right]. \quad (12)$$

При $\frac{L^{(-)}}{L^{(+)}} \ll 1$ мы получаем $c \approx 1 - \left(\frac{h^{(-)}}{h^{(+)}} \right)^2$. (13)

Из (12 и 13) очевидно, что параметр (c) зависит от типа прибрежной зоны и для конкретного водоема требуется экспериментальное его определение. Приняв $(h^{(-)}/h^{(+)}) = 0,5$ получаем $c \approx 0,75$.

С учетом этого запишем окончательное выражение для вычисления высоты волн в прибрежной зоне в виде:

$$h(x) = h^{(+)} \cdot \left[1 - c \cdot \left(1 - \frac{x}{L^{(+)}} \right) \right]^{1/2} \approx h^{(+)} \cdot \left[0,25 \cdot \left(1 - \frac{x}{L^{(+)}} \right) \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где x – расстояние от берега.

Приняв во внимание среднюю статистическую зависимость высоты волн от скорости ветра $h^{(+)} \approx 0,16 \frac{U_Z^2}{g}$ [22] и отношение $L^{(+)} = \frac{H^{(+)}}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{g}{\omega^2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{\lambda^{(+)}}{2\pi \operatorname{tg} \alpha} \approx 2 \frac{U_Z^2}{g \cdot \operatorname{tg} \alpha}$, получаем необходимое выражение для расчета высоты волн в прибрежной зоне в окончательном виде:

$$h(x) = 0,16 \frac{U_Z^2}{g} \cdot \left[1 - c \cdot \left(1 - \frac{x}{2U_Z^2/g \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \right]^{1/2}. \quad (15)$$

Зависимость (15) в комбинации с эмпирической зависимостью (6) позволяет вычислять значения потоков тепла, влаги и количеств

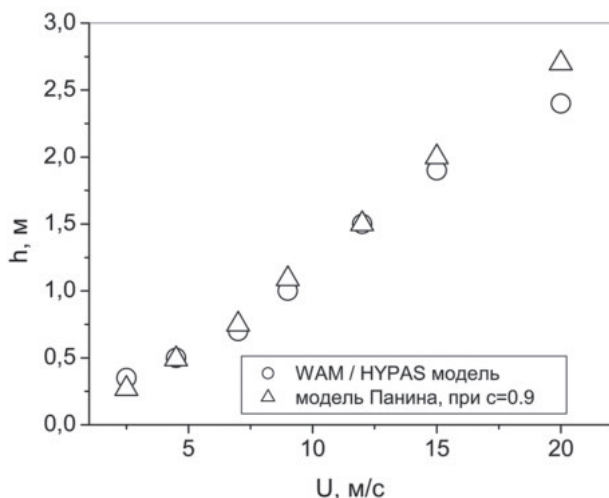


Рис. 4. Результаты сопоставления наших расчетов высоты волн с данными, полученными по модели WAM (WADIM Group, 1988) при скоростях ветра, меняющихся от 2,5 м/с до 20 м/с

ва движения на различных расстояниях от берега. Для этого достаточно определить значение $tg\alpha = \frac{H(x)}{L(x)} \approx \frac{H^{(+)}}{L^{(+)}}$ и значение коэффициента (c).

Но вначале следует убедиться в правильности нашего метода определения высоты волны в прибрежной зоне. Для этого использовались результаты расчета высоты волн на Балтийском море [23] при помощи WAM-модели [24]. Результаты расчета параметров волн при помощи WAM-модели предварительно сопоставлялись с данными измерения параметров волн с буя в Балтийском море, что показало хорошее согласование [23]. Здесь же приведем результаты сопоставления (рис. 4) расчетов высоты волн по модели Панина с данными, полученными по модели WAM [24] при скоростях ветра, меняющихся от 2,5 м/с до 20 м/с.

Расчеты показали, что при скоростях ветра в диапазоне от 2,5 м/с до 15 м/с модели дают близкие значения высоты волны и расхождения начинаются при скоростях больших, чем 15 м/с, достигая 0,5 м/с при скорости ветра 20 м/с.

Для количественного определения величин потоков тепла, влаги и импульса в прибрежной зоне конкретных водоемов необходимо

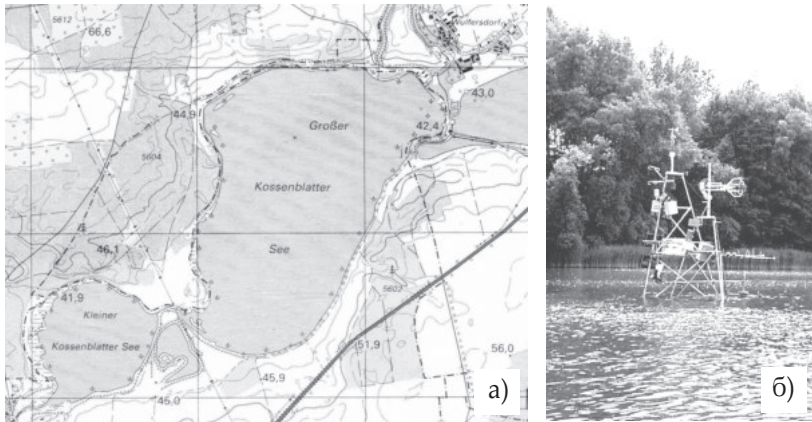


Рис. 5. Большое Коссенблатское озеро (а) и вид мачты для измерения вертикальных потоков тепла, влаги и импульса в сочетании с радиационными потоками (б), расположенной в озере на глубине 2,5 м

располагать информацией о значениях этих потоков в их открытой глубоководной зоне. Эта информация может быть получена в результате проведения эксперимента на глубокой воде или путем использования данных модельного расчета значений указанных потоков (см. формулы 4, 6).

Сопоставление результатов модельных расчетов с экспериментальными данными

Мелководный водоем

Данные для проверки модели тепло-влажнообмена мелководных акваторий с атмосферой были получены в экспериментах LITFASS-98, [25, 26] и LITFASS-2003, которые проводились силами ученых ведущих университетов Германии на территории Саксонии (в районе метеорологической обсерватории Линденберг, которая находится в 50 км от Берлина в южном направлении). В течение этих экспериментов поверхностные потоки были измерены над различными типами подстилающей поверхности, включая Большое Коссенблатское озеро (рис. 5а) Вертикальные потоки тепла, влаги и импульса в сочетании с радиационными потоками измерялись с мачты, расположенной в озере, глубиной 2,5 м. (рис. 5б).

Основные результаты сопоставления представлены на рисунках 6 и 7. Рис. 6а и 6б иллюстрируют роль эффекта мелководья при

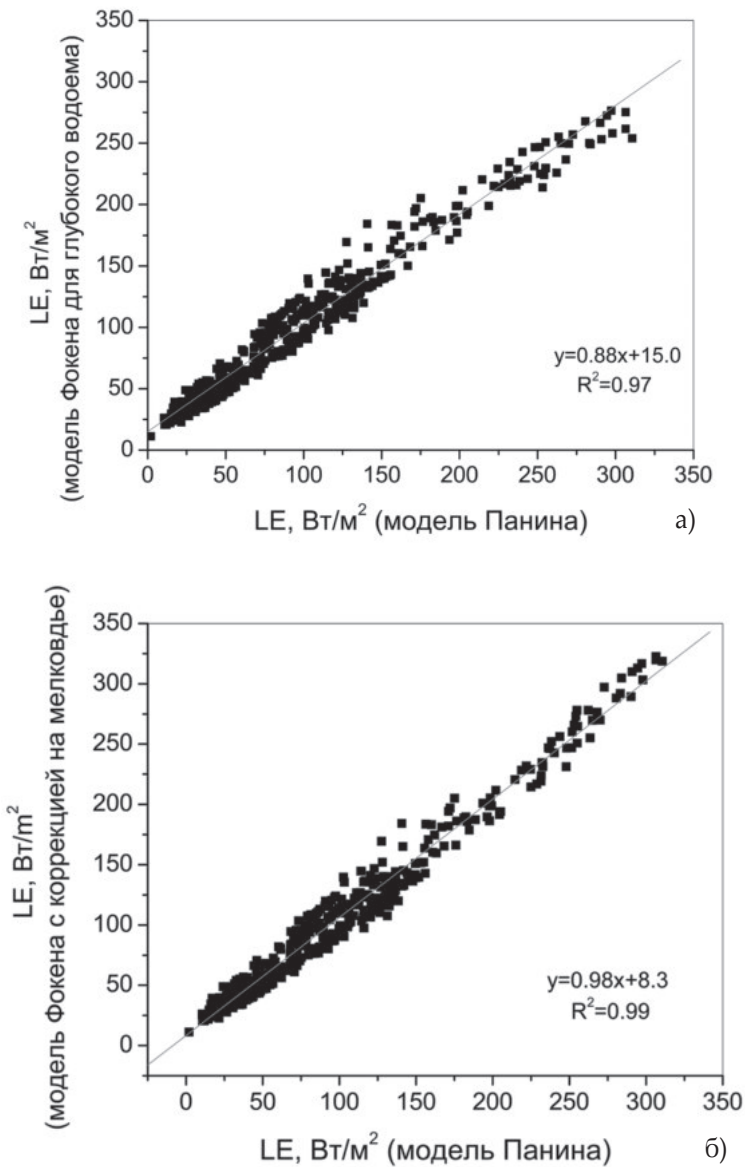


Рис. 6. Сопоставление результатов расчета скрытого теплообмена при помощи модели Панина с моделью Фокена без коррекции на мелководную интенсификацию испарения (а) и с коррекцией на мелководную интенсификацию испарения, (б) для Большого Коссенблатского озера в течение эксперимента LITFASS-98

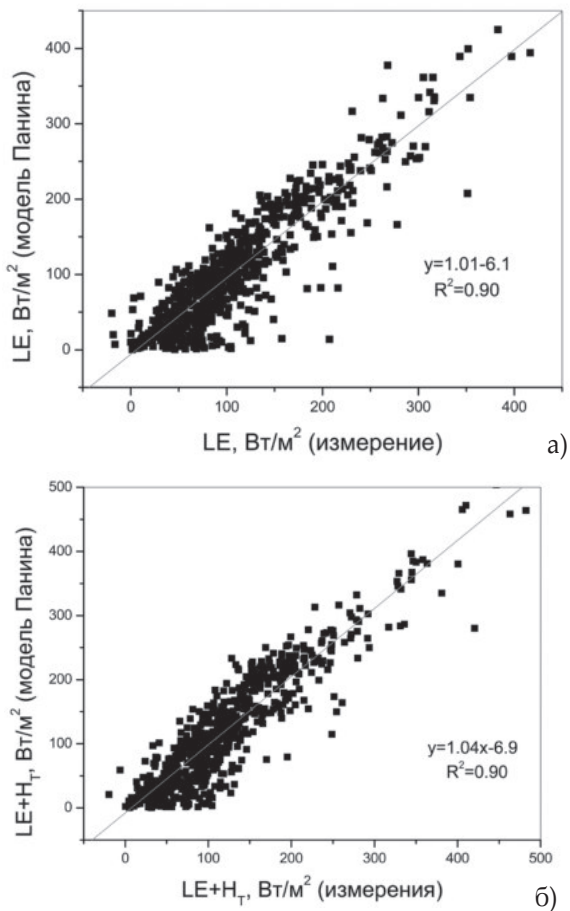


Рис. 7. Сопоставление результатов прямых измерений и расчета скрытого теплообмена () и результирующего теплообмена () при помощи модели Панина для Большого Косенблатского озера в течение эксперимента LITFASS-2003 для ветров направлений от 180° до 330°

модельных расчетах потоков влаги. Сопоставление модели Панина с моделью Фокена [7–9] для глубокого моря показало систематическое отличие между моделями на 12% (рис. 6а), причем это различие увеличивается при больших величинах испарения и достигает 75 Вт/м^2 при испарении равном 300 Вт/м^2 . Учет эффекта интенсификации испарения за счет глубины в модели Фокена (рис. 6б) приводит почти к полному совпадению модельных расчетов (отличия

составляют только 2%). Непосредственное сопоставление модельных расчетов с данными прямых измерений турбулентных потоков влаги (рис. 7а) и полного теплообмена ($LE+H_T$) (рис. 7б) дало также хорошие результаты.

Точность воспроизведения потоков скрытого тепла в эксперименте LITFASS-2003 нашей моделью составила 1% при коэффициенте корреляции 0,9. Полный теплообмен ($LE+H_T$) воспроизводится моделью с ошибкой 4% при коэффициенте корреляции 0.9.

Прибрежная мелководная зона

Очень часто возникает неопределенность в выборе той или иной зависимости для коэффициента сопротивления водной поверхности C_D . В большинстве случаев используется зависимость C_D от скорости ветра в виде:

$$10^3 \cdot C_D = a + b U_{10} \quad (16)$$

Наиболее часто зависимость (16) используется со следующими значениями для коэффициентов a и b [27]:

$$10^3 \cdot C_D = 0,75 + 0,067 U_{10}.$$

Однако большинство экспериментов было выполнено в прибрежной и мелкой зоне, где крутизна поверхностных волн, как уже отмечалось, выше, чем в глубоководных акваториях. Все это должно приводить к увеличению сопротивления водной поверхности и соответствующей интенсификации взаимодействия мелководной зоны с атмосферой. По крайней мере можно ожидать, что простая зависимость (16) должна быть скорректирована с учетом влияния глубины бассейна на сопротивление водной поверхности.

Известен целый ряд результатов экспериментальных исследований, где значения коэффициентов a и b сильно варьирует и прослеживается определенная зависимость их от глубины водоема. Измерения Донелана [28] на озере Онтарио при глубине 10 м дали для a и b значения 0,37 и 0,137, соответственно. Более поздние измерения [29] на озере Вашингтон при глубине 4 м для коэффициентов a и b получили значения 0,87 и 0,078, соответственно. Измерения Графа на озере Женева при глубине 3 м для a и b дали значения 1,09 и 0,094, соответственно. Вирина [30] на озере Флево при глубине 3 м получил для a и b соответственно значения 2,21 и 0,020. Используя опубликованные данные, мы определили значения коэффициента сопротивления вод-

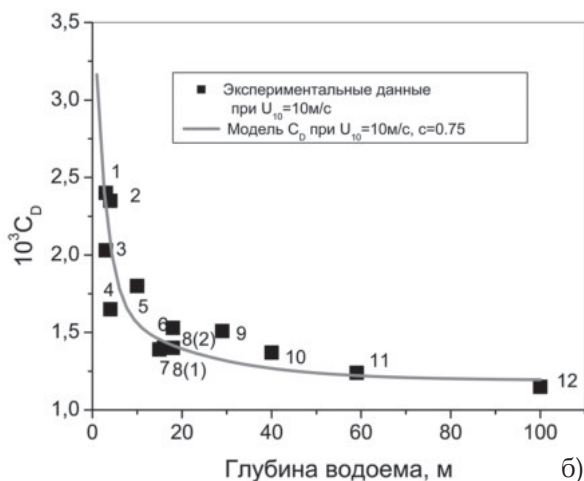
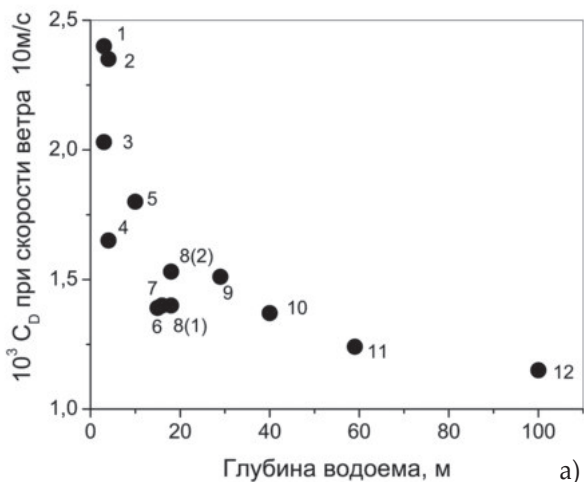


Рис. 8. Зависимость коэффициента сопротивления (C_D) от глубины моря при скорости ветра $U_{10}=10$ м/с (а). Точки 1–12 – экспериментальные данные: 1 – Wieringa, 1972, озеро Флево (глубина в точке измерения 3 м); 2 – Panin et al., 1996, Северный Каспий (глубина в точке измерения 4 м); 3 – Graf et al., 1984,zero Женева (глубина в точке измерения 3 м); 4 – Atakturk and Katsaros, 1999, озеро Вашингтон (глубина в точке измерения 4 м); 5 – Donelan, 1982, озеро Онтарио (глубина в точке измерения 10 м); 6 – Sheppard et al, 1972, озеро Лохнесс (глубина в точке измерения 15 м); 7 – Geernaert et al, 1986, Северное море (глубина в точке измерения 16 м); 8 (1) – эксперимент НЕХМАХ, Северное море (глубина в точке измерения 18 м) (Smith et al, 1992); 8 (2) – эксперимент НЕХМАХ, Северное море (глубина в точке измерения 18 м) (реанализ данных измерения потока импульса), (Oost, 1998); 9 – Geernaert et al., 1987, Северное море (глубина в точке измерения 29 м); 10 – Kitaigorodskii et al, 1973, Каспийское море (глубина в точке измерения 40 м); 11 – Smith (б), модельный расчет коэффициента сопротивления при $c=0,75$ (сплошная линия)

ной поверхности C_D при скорости ветра 10 м/с и проанализировали изменения его непосредственно в зависимости от глубины водоема (рис. 8а). Экспериментальные точки 12-ти независимых экспериментов показывают четкую зависимость C_D от глубины.

Заметим, что для других скоростей ветра также возможно представить подобные эмпирические зависимости. Однако при малых скоростях ветра (менее 5 м/с) корреляция между коэффициентом сопротивления водной поверхности C_D и глубиной бассейна уменьшается и зависимость становится менее определенной. Очевидно, что со снижением скорости ветра возрастает роль стратификации пограничного слоя воздуха и это приводит к ухудшению самой зависимости.

Полный обзор измерений турбулентных потоков и их анализ при слабых ветрах сделан (Kantai Clayson, 2000). Анализ энерго-массообмена между глубоким морем и атмосферой показал, что важным параметром становится возраст волн [31, 32, 33, 34, 35].

Здесь мы специальное внимание уделяем процессам взаимодействия прибрежной мелководной зоны моря с атмосферой. Рисунок 8б убедительно показывает практически полное согласование результатов расчета коэффициента сопротивления водной поверхности C_D по нашей модели при $c=0,75$ с данными всех 12-ти независимых экспериментов.

Учет эффекта мелководий для уточнения испарения Северного Каспия и залива Кара-Богаз-Гола

Приведем наши новые оценки роли глубины в испарении Северного Каспия, но предварительно остановимся коротко на анализе ветрового и волнового режима. Наибольший эффект в интенсификации испарения Северного Каспия, как отмечалось выше, может дать штормовой ветер. Наиболее сильный шторм наблюдался здесь в ноябре 1952 г. Он был вызван устойчивым по направлению юго-восточным ветром большой продолжительности (4 суток). Скорость ветра в период шторма составляла 34 м/с.

Повторяемость величины скорости ветра без учета направления, представленная в таблицах 1 и 2, свидетельствует, что сильные ветра (более 15 м/с) наблюдаются в 3% случаев. В то же время число дней в течение года с ветрами более 15 м/с, например, на станции Форт Шевченко может составлять от 40 суток до 70 суток.

Таблица 1

Повторяемость скоростей ветра по градациям (Алиев и др., 1988)

Скорость, м/с	Повторяемость, %	Скорость, м/с	Повторяемость, %
Менее 2	6	10–12	12
2–4	14	12–14	7
4–6	20	14–16	3
6–8	19	16–18	2
8–10	16	Более 18	1

Таблица 2

**Повторяемость скорости ветра на о. Тюлений
за апрель–ноябрь 1937–1995 гг. (по Скриптунову)**

Скорость ветра, м/с	Повторяемость, %
Штиль	13,07
1–5	42,4
6–10	37,3
11–15	5,9
16–20	1,25
21–25 и более	0,08

Согласно данным Скриптунова (табл. 2) скорость ветра не превышает 5 м/с в 55% случаев. Это означает, что в 45% случаев влияние мелководий важно учитывать.

С ростом скорости ветра продолжительность его действия уменьшается (табл. 3).

Таблица 3

**Повторяемость ветров (%) различной скорости и продолжительности по
данным ГМС Форт-Шевченко (Кошинский, 1975)**

Скорость, м/с	Нижний предел продолжительности, час			
	6	12	24	48
менее 3	25	20	8	1
4–6	24	12	3	0,2
7–9	23	10	2	–
10–14	26	14	8	0,4
15–19	28	8	2	–
20–24	33	12	–	–

В условиях Северного Каспия волны достигают предельного для мелководных акваторий развития, происходит обрушение всех крупных и средних по высоте волн, что может привести к заметной интенсификации испарения и теплообмена здесь. В связи с мелко-

водностью Северного Каспия при возникновении ветра волнение быстро приобретает характер установившегося. Параметры волн имеют слабую зависимость от направлений ветра. Волны отличаются большой крутизной, которая при развитии волнения может достигать предельного значения $\frac{1}{2}$.

По особенностям режима волнения и условиям развития волн в Северном Каспии можно выделить два района: восточный и западный. Восточный район представляет собой мелководный бассейн с наибольшими глубинами 8 м в его центральной части (Уральская бороздина). Западный район напоминает залив, открытый со стороны Среднего Каспия, в северной своей части эта акватория переходит в мелководную зону предустьевоего взморья р. Волги.

Повторяемость волнения тесно связана с повторяемостью ветра в Северном Каспии. Ветры восточного направления преобладают в течение всего года, особенно в зимние месяцы. Зимой их повторяемость приближается к 30, а в июне и в июле – к 10%. Такой же годовой ход повторяемости характерен и для юго-восточного ветра, что, по-видимому, связано с воздействием сибирского антициклона, который достигает максимального развития зимой и почти исчезает летом. В летние месяцы (июнь, июль) увеличивается повторяемость западных, северо-западных и северных ветров. Повторяемость северо-восточного ветра в течение всего года меняется в небольших пределах за исключением декабря, когда она минимальна (8,4%). Значительно реже других в Северном Каспии наблюдаются ветры южного и юго-западного направлений. Наибольшая повторяемость штилей отмечается в летние месяцы и в начале осени (июль, август, сентябрь, октябрь).

Интенсификация испарения и теплообмена здесь может быть связана также с стонно-нагонными колебаниями. В Северном Каспии обширные мелководья, малые уклоны дна и суши, конфигурация береговой черты, активная ветровая обстановка создают благоприятные условия для развития значительных стонно-нагонных колебаний уровня.

Согласно рис. За можно констатировать, что в естественных условиях (в пределах диапазона характерных скоростей ветра) испарение с мелководий теоретически может превышать в 1,5–2 раза величины испарения с глубоководных акваторий. В действительности

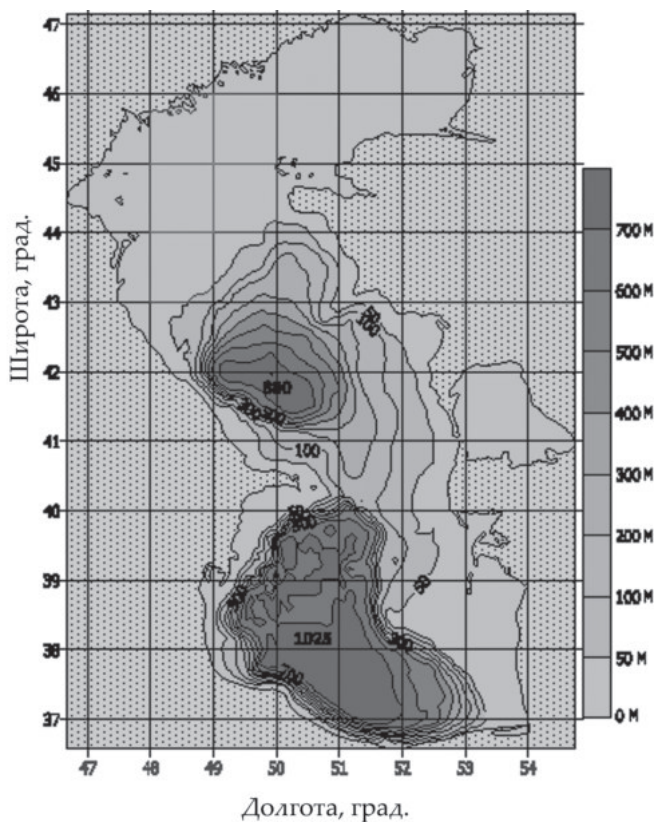


Рис. 9. Батиметрическая карта Каспийского моря

повторяемость скоростей сильного ветра (более 15 м/с) мала (табл. 1 – 3), поэтому их вклад в суммарное испарение не должен быть столь великим.

Но сделаем соответствующие оценки применительно к Северному Каспию. Следуя нашей модели, для оценки влияния мелководий необходимо иметь статистическую информацию о ветре, его повторяемости, а также информацию о глубине и площади. Приведем карту батиметрии Каспийского моря (рис. 9) и отдельно залива Кара-Богаз-Гола, полученной с использованием батиметрических данных Д.А. Лаврова (рис. 10).

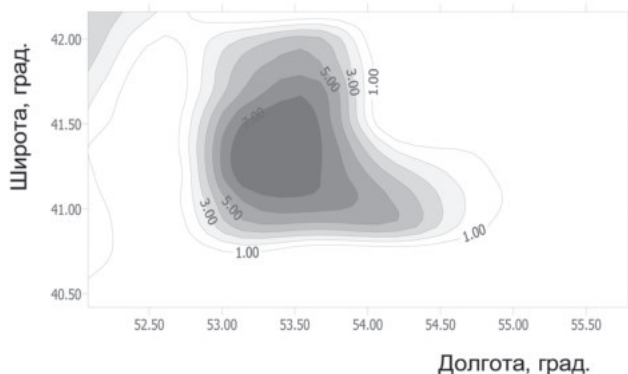


Рис. 10. Карта глубин Кара-Богаз-Гола летом в 1999 г. (по данным Д.А. Лаврова)

Примеры расчета интенсификации испарения Северного Каспия при ветрах 10 и 20 м/с приведены на рис. 11а и 11б, соответственно.

Наши оценки показывают, что при скорости ветра 10 м/с в прибрежной зоне Северного Каспия интенсификация испарения достигает 15%, а при скорости ветра 20 м/с достигает 30%. В более глубокой средней части Северного Каспия увеличение испарения за счет учета глубины моря составляет 5 и 10%, соответственно.

Межгодовой ход слоя испарения E с поверхности Северного Каспия заметно отличается от ранее полученного [3]. Средняя годовая величина испарения с поверхности Северного Каспия составила 114,9 см, что на 14 см выше ранее рассчитанной нами без учета мелководий [3].

В качестве примера приведены распределения среднесезонных (за период с 1904 г. по 1987 г.) значений скрытой теплоты по акватории Каспийского моря в апреле (рис. 12а, б) и июле (рис. 13а, б) соответственно без и с учетом интенсификации вертикального обмена за счет глубины.

Таким образом, можно констатировать, что созданная модель тепло-влагообмена мелководных и прибрежных акваторий с атмосферой позволяет уточнять значения характеристик взаимодействия моря с атмосферой на основе стандартной гидрометеорологической информации. Для создания модели и ее проверки использовались как данные прямых измерений турбулентных потоков импуль-

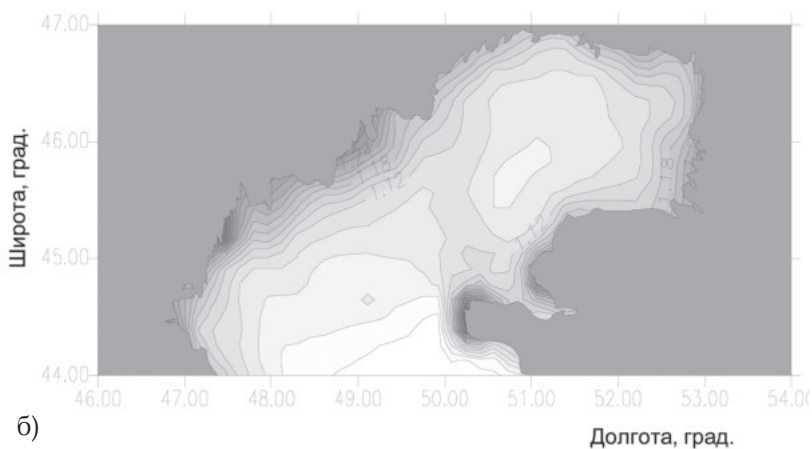
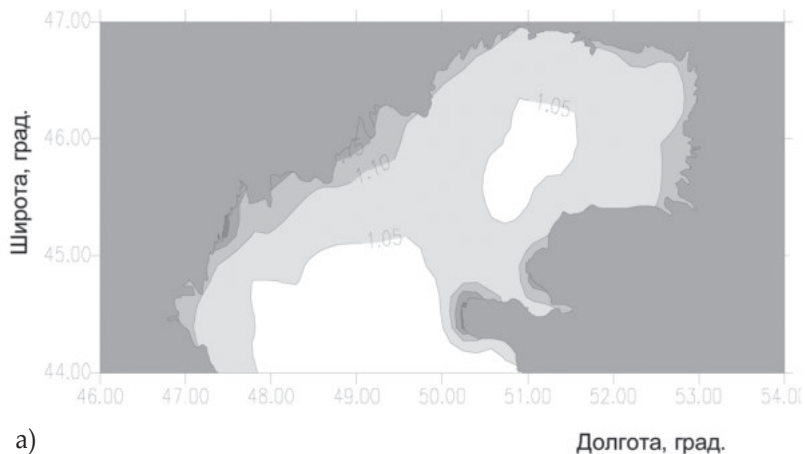


Рис. 11. Результаты расчета интенсификации испарения Северного Каспия при 10 м/с (а) и при 20 м/с (б)

са, тепла и влаги, так и характеристик поверхностных волн. Данные были получены как на глубоководных и мелководных акваториях открытого моря, так и в его прибрежных зонах. Наша новая модель позволяет оценить непосредственное влияние глубины водоема на процессы энерго-массообмена как открытого моря, так и в его прибрежных зонах.

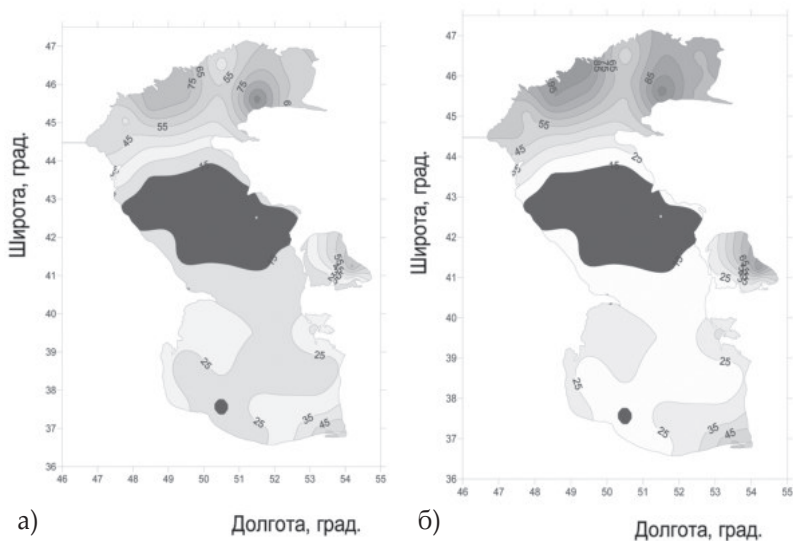


Рис. 12. Распределение среднеголетних (за период с 1904 по 1987г.) значений скрытой теплоты по акватории Каспийского моря в апреле без учета (а) и с учетом (б) интенсификации вертикального обмена за счет глубины

Приведенные примеры свидетельствуют, с одной стороны, о значительном влиянии глубины водоема на интенсивность энергообмена в естественных условиях. С другой стороны, приведенные примеры иллюстрируют хорошее согласование модельных расчетов с экспериментальными данными. В реальных условиях, с использованием непосредственных данных о глубине, площади и повторяемости скорости ветра, учет эффекта мелководий приводит к увеличению результирующей величины испарения с поверхности Северного Каспия на 14%.

Заключение

Можно констатировать, что приведенные результаты свидетельствуют о существенном упущении в исследовании природы взаимодействия водоема с атмосферой. Проведенный нами обзор методов расчета значений испарения, а также тепло и энергообмена показал, что в современных моделях тепло-массообмена между водоемами и атмосферой не учитываются особенности мелкомасштабного взаимодействия мелководий с атмосферой. Волны в мелководных акваториях более крутые, чем в открытых и глубоководных частях

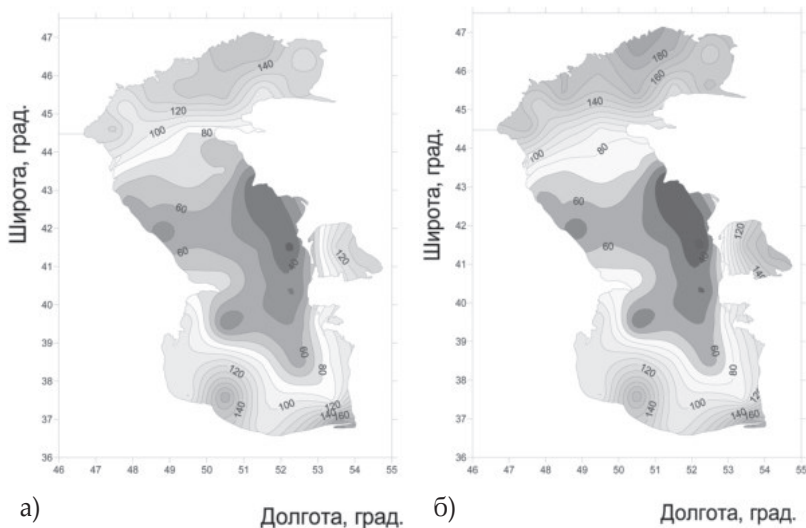


Рис. 13. Распределение среднегоголетних (за период с 1904 г. по 1987 г.) значений скрытой теплоты по акватории Каспийского моря в июле без учета (а) и с учетом (б) интенсификации вертикального обмена за счет глубины

морях и раньше (при более низких скоростях ветра) обрушаются. Все это приводит к усилению шероховатости водной поверхности в аэродинамическом смысле и соответственно к более интенсивному турбулентному обмену импульсом, теплом и влагой. Проведенный обзор показал также, что на сегодняшний день вообще нет какого-либо надежного метода определения испарения и теплообмена мелководных озер и прибрежной зоны морей.

Показано, что сравнение различных параметризаций для вычисления явных и скрытых потоков тепла для открытого моря, скорректированных с учетом эффекта мелкой воды, дает хорошие результаты. Даже для низких скоростей ветра, эффект увеличения потоков для мелких озер (например экспериментов LITFASS-98 и 2003) достигает значений 10–20%, которые выше чем различия между рассчитанными и измеренными потоками. Это свидетельствует о том, что для озер, где доступен стандартный набор данных о скорости ветра, воздушной и водной температуре, воздушной влажности и глубине, вполне можно использовать предложенную параметризацию. Модель энегообмена между водоемом и атмосферой в прибрежной зоне также хорошо согласуется с экспериментальными

данными о коэффициенте сопротивления, измеренного разными авторами.

В целом, наши теоретические обобщения и экспериментальные исследования роли глубины водоема в интенсификации испарения, теплообмена и трения водной поверхности, а также первые оценки этого эффекта в испарении Северного Каспия убедительно иллюстрируют универсальность новой модели. Приведенные результаты свидетельствуют, с одной стороны, о значительном влиянии глубины водоема на интенсивность энергообмена в естественных условиях. С другой стороны, приведенные примеры иллюстрируют хорошее согласование модельных расчетов с экспериментальными данными. В реальных условиях, с использованием непосредственных данных о глубине, площади и повторяемости скорости ветра, учет эффекта мелководий приводит к увеличению результирующей величины испарения с поверхности Северного Каспия более чем на 10%.

Особенности пространственного изменения испарения Каспийского моря позволяют высказать также предположение о возможном существовании вынуждающей силы формирования поверхностных течений, не учитываемой ранее при моделировании течений. Эта сила связана с неоднородностью слоя испарения (интенсивное испарение весной и в первой половине лета на севере и юге Каспия приводят к перепаду уровней воды между Средним Каспием и северной и южной его частями) и может оказать существенное влияние на формирование циркуляции воды во всем море. Можно ожидать, что эта циркуляция (усиление которой должно происходить весной и в первой половине лета из-за интенсификации испарения мелководного Северного Каспия) имеет сезонный характер. Осенью и в начале зимы поле испарения выравнивается по пространству и в эти сезоны можно ожидать иную картину в поле течений. Очевидно, что в рамках трехмерной термогидродинамической модели (например, модели гидродинамики внутреннего моря (МГВМ)) возможно воспроизвести подобные течения. МГВМ представляет собой совместную модель трехмерных термогидродинамических процессов моря, модель взаимодействия пограничных слоев атмосферы и моря и модель термогидродинамики морского льда. Принципиально важными особенностями МГВМ являются воспроизведение в модели процессов, вызываемых обменом водами через

боковые границы (сток рек, обмен через проливы); изменчивости массы воды в море и, как следствие, изменчивости верхней границы моря; изменчивости топографии поверхности моря, возникающей из-за реакции моря на быстрые изменения внешнего воздействия; взаимодействия атмосферы и моря; формирования льда и его влияния на процессы тепло – и влагообмена между атмосферой и морем. Первые численные результаты обнадеживают [36]. Модель воспроизводит сезонную изменчивость среднемесячных течений на поверхности моря, которую можно разделить на три периода: преобладающие циклонические круговороты в среднем и южном Каспии, характерные для декабря-января; доминирование в глубоководных частях Среднего и Южного Каспия экмановского переноса поверхностных вод на юг и юго-запад в период с февраля по август и переходных между двумя указанными типами течений в период с сентября по ноябрь. Одним из важных аргументов в пользу существования поверхностной циклонической системы течений было распространение теплых вод на север вдоль восточного берега моря. Результаты модельных исследований показывают, что поток на север вдоль восточного берега стабильно существует правда только в подповерхностном слое, в то время как поверхностные течения чаще направлены на юг. Анализ наблюдений над течениями подтверждает полученную в модели структуру течений на восточном шельфе моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика, Гидрометеиздат, ч. 1, 1992. 639 с.
2. Панин Г.Н. Тепло- и массообмен между водоемом и атмосферой в естественных условиях, М., Наука, 1985. 206 с.
3. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря, М., Наука, 1987. 88 с.
4. Голицын Г.С., Панин Г.Н. О водном балансе и современных изменениях уровня Каспия // Метеорология и гидрология, 1989. №1. С. 57–64.
5. Panin G.N., Nasonov A.E. Problems of measurement and calculation of surface fluxes in KUREX-91 experiment // Remote Sensing Reviews 17. №2. 1998. P. 281–290.
6. Kanemasu E.T., Verma S.B., Smith E.A., Fritschen L.J., Wesely M., Field R.T., Kustas W.P., Weaver H., Stewart J.B., Gurney R., Panin G.N., Moncrieff J. 'Surface Flux Measurements in FIFE: An Overview // J. Geophys. Res. 97. №D17. 1992. P. 18,547–18,556.

7. Foken T. The parametrisation of the energy exchange across the air-sea interface // *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, 8, №3. 1984. P. 297–305.

8. Foken T. An operational model of the energy exchange across the air-sea interface // *Zeitschrift für Meteorologie*, 36, №3. 1986. P. 354–359.

9. Foken T., Kitajgorodskij S.A. and Kuznecov O.A. On the dynamics of the molecular temperature boundary layer above the sea // *Boundary-Layer Meteorology*, 15, №3. 1978. P. 289–300.

10. Панин Г.Н., Кривицкий С.В. Аэродинамическая шероховатость поверхности водоема, М., Наука, 1992. 135 с.

11. Китайгородский С.А., Кузнецов О.А., Панин Г.Н. О коэффициенте сопротивления, теплообмена и испарения и расчетах потоков импульса, тепла и влаги над морской поверхностью в атмосфере // *Изв. АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана*. Т. 9. №11. 1973. С. 1135–1141.

12. Панин Г.Н., Раабе А., Кривитский С.В., Бенилов А.Ю., Маринов С. Мелкомасштабное взаимодействие между морем и атмосферой в прибрежной зоне // *Водные ресурсы* 21. №1. 1994. С. 59–68.

13. Benilov A.Yu., Kuznetsov O.A., Panin G.N. On the analysis of wind wave-induced disturbances of the atmospheric turbulent surface layer // *Boundary-layer Meteorol.*, Vol. 6, №1/2, 1974. P. 269–285.

14. Panin G.N. Some experimental results from studies of air-sea interaction // *Boundary-Layer Meteorol.*, 50, №1/2. 1990. P. 147–152.

15. Голицын Г.С., Грачев А.А. Скорости и теплообмен при конвекции в двухкомпонентной среде // *ДАН СССР* 1980. Т. 255. №3. 1989. С. 548–552.

16. Raabe A., Panin G.N., Schoenfeldt H.-Y. Die Variabilität des Windreibungskoeffizienten über See in der Nähe einer Küste mit steil ansteigendem // *Ufer, Z. Meteorol.* 37, №2, 1987. P. 137–147.

17. Panin G.N., Nasonov A.E., Souchintsev M.G. Measurements and estimation of energy and mass exchange over a shallow sea In *The Air-Sea Interface*. (ed. M. Donelan). Miami, Florida, USA, 1990., Publ. The Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sc., 1996. P. 489–494.

18. Jacobs A.F.G, Heusinkveld B.G, Nieveen J.P. Temperature behavior of a natural shallow water body during a summer periode // *Theor Appl Climat* 59. №1/2. 1998. P. 121–127

19. Найденов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши, М., Наука, 2004. 318 с.

20. Panin G.N, A.E. Nasonov, Th. Foken, H. Lohse. Evaporation and sensible heat exchange for a shallow lake // *Theor. Appl. Climat*. 2006. (в печати).

21. Stull R.B. An introduction to boundary layer meteorology. *Atm. Sci. Lib.*, Kluwer Academic Press., Dordrecht/Boston/London, 1988. 666 p.

22. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Волны в океане. Гидрометеиздат, 1985. 256 с.

23. Boornngen M., H.-J. Schoenfeldt, F. Riechmann, G.N. Panin, G. Tetzlaff. Wind atlas and wave atlas for the area of Darss and Zingst. *Wiss. Mitteilungen Inst. f. Meteorol. Leipzig*, 10., 1998. 134 p.

24. WADIM Group (S and K. Hasselman, P.A.E.M. Janson, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Restad, L. Zambresky, J.A. Ewing): The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model // *J. Phys. Oceanogr.* 18, №6. 1988. P. 1775–1810.

25. Beyrich F. LITFASS-98 Experiment, 25.5.1998–30.6.1998, Experimental Report. Deutscher Wetterdienst, Forschung und Entwicklung, Arbeitsergebnisse, 62. 2000.

26. Beyrich F., Herzog H.-J. and Neisser J. The LITFASS project of DWD and the LITFASS-98 Experiment: The project strategy and the experimental setup // *Theoretical and Applied Climatology*, 73. №3/4. 2002. P. 3–18.

27. Geernaert G.L. Bulk parametrizations for the wind stress and heat fluxes. In G.L. Geernaert and W.J. Plant (Eds.), *Surface Waves and Fluxes*, Vol.1. 1990. P. 91–172. Kluwer Academic, Dordrecht/Norwell, MA.

28. Donelan M.A. The dependence of the aerodynamic drag coefficient on wave parameters, in *Proc First International Conference on Meteorology and Air-Sea Interaction of the Coastal Zone*, American Meteorological Society. 1982. P. 381–387.

29. Atakturk S.S., Katsaros K.B. Wind stress and surface waves observed on lake Washington // *J. Phys. Oceanogr.* 29, №3. 1999. P. 633–650.

30. Wieringa J. Tilt errors and precipitation effects in trivane measurements of turbulent fluxes over open water // *Boundary Layer Meteorol.*, 2, №3. 1972. P. 406–426.

31. Garratt J.R. The internal boundary layer – A review // *Boundary-Layer Meteorol.*, 50, №2. 1990. P. 171–203.

32. Kanta L.H., Clayson C.A. *Small scale processes in geophysical fluid flows*, Academic press, 2000. 888 p.

33. Kudryavtsev V.N., Makin V.K., Meirink J.F. Simplified model of the air flow above waves // *Boundary Layer Meteorol.*, 100, №1. 2001. P. 63–90.

34. Oost W.A. The KNMI HEXMAX stress data – A Reanalysis // *Boundary Layer Meteorol.*, 86, №3. 1998. P. 447–468.

35. Schmid H.P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes // *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, №2. 1997. P. 179–200.

36. Ибраев Р.А. Исследование чувствительности решения модели динамики течений Черного моря к условию свободной поверхности моря // *Океанология*, 2001. 41, №5. С. 645–652.

Пряжинская Валентина Гавриловна

(26.8.1933 – 28.5.2017)

Пряжинская Валентина Гавриловна – крупный учёный, талантливый руководитель, доктор технических наук, профессор, «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», действительный член Российской экологической академии.

В.Г. Пряжинская родилась 26 августа 1933 г. в селе Исиль-Куль Исиль-Кульского района Омской области. После окончания средней школы поступила на механико-математический факультет Томского государственного университета, который окончила в 1956 г. по специальности «математика». Её

первые научные достижения связаны с обучением в аспирантуре Томского университета по кафедре общей математики и защитой кандидатской диссертации на тему: «Некоторые задачи фильтрации».

Активная научная деятельность В.Г. Пряжинской началась в 1961 г. в отделе прикладной гидродинамики Института гидродинамики СО АН СССР. В то время большое влияние на её работу оказала академик П.Я. Полубаринова-Кочина, создавшая новое направление в стационарной фильтрации. В Институте гидродинамики СО РАН В.Г. Пряжинская прошла путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией фильтрации, которую возглавляла более восьми лет, под её руководством получили развитие работы, связанные с приложением задач стационарной фильтрации для оптимизации орошения. В 1971 г. защитила диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук по теме: «Оптимальные модели орошения».



В 1975 г. В.Г.Пряжинская была избрана по конкурсу на должность заведующего сектором системного анализа Института водных проблем Академии наук СССР (ныне – ИВП РАН), в котором проработала более 40 лет.

Валентина Гавриловна – известный специалист в области системного анализа водных проблем; основатель нового научного направления – оптимизация водопользования и планирование водоохранной деятельности в речных бассейнах. Её научная деятельность посвящена теоретическим разработкам и практическим приложениям математических моделей поддержки принятия решений в управлении водными ресурсами к конкретным водным объектам.

В.Г.Пряжинская – автор и соавтор более 160 научных работ, в том числе 10 монографий; основные результаты её исследований отражены в публикациях: Полубаринова-Кочина П.Я., Пряжинская В.Г., Эмих В.Н. Применение математических методов при водохозяйственных расчетах. М.: Наука 1969; Пряжинская В.Г. Математическое моделирование в водном хозяйстве М., Наука, 1985; *Water Resources Management in the Face of Climatic / Hydrologic Uncertainties/* Eds.: Z. Kaczmarek, K. Strzepek, L. Somlyódy and V. Priazhinskaya. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996; Пряжинская В.Г., Ярошевский Д.М., Левит-Гуревич Л.К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами М., ИВП РАН, Физматлит, 2002; Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В. Г., Хранович И.Л. и др. «Обоснование стратегий управления водными ресурсами». М., «Научный мир». 2006; *Водные ресурсы и качество вод. Состояние и проблемы управления / Отв. ред.: чл.-корр. РАН В.И. Данилов-Данильян, д.т.н. проф. В.Г.Пряжинская.* М.: РАСХН. 2010; *Экономические и территориальные аспекты управления водохозяйственным комплексом России/ под ред. В.И. Данилов-Данильяна, В.Г.Пряжинской.* М.: РАСХН. 2013.

Работы В.Г.Пряжинской получили международное признание: она работала в Комитете по управлению водно-ресурсными системами Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ), была экспертом UNEP по проблеме рационального использования водных ресурсов р. Евфрат, участвовала в разработке Схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов Республики Куба, в Водном проекте Международного института прикладно-

го системного анализа (Вена, Австрия) по оценке влияния изменений климата на управление водными ресурсами.

В.Г. Пряжинская – опытный руководитель и организатор науки: в 1975–86 гг. возглавляла сектор системного анализа, в 1994–2004 гг. – лабораторию управления водными ресурсами; в 1989–94 г. – заместитель директора Института по научной работе. Валентина Гавриловна уделяла большое внимание подготовке научных кадров, в течение многих лет руководила работой Всероссийской школы-семинара «Системные исследования водных проблем». Под её руководством защищено 15 кандидатских диссертаций.

В.Г. Пряжинская награждена двумя медалями и грамотой Президиума РАН.

Валентина Гавриловна была мудрым, выдержанным, корректным и доброжелательным человеком, глубоко преданным науке. Она работала до последнего дня своей жизни; ниже приведена её статья, подготовленная к публикации за несколько дней до скоропостижной кончины. Её уход – невосполнимая утрата для коллектива Института, сотрудников лаборатории управления водными ресурсами, близких и коллег. Память о Валентине Гавриловне навсегда сохранится в сердцах всех, кому посчастливилось знать её и работать вместе.

*Р.И. Бедная (ИВП РАН),
М.И. Степанова (ИВП РАН)*

Методическая поддержка решений по управлению качеством природных вод¹

В.Г. Пряжинская

Введение

Исследуется проблема обоснования методов охраны природных вод как для водных объектов (учитываются сосредоточенные и распределенные источники сброса сточных вод), так и для водосборной территории (для неточечных, диффузных источников загрязняющих веществ – ЗВ). Поддержка решений по управлению качеством природных вод базируется на математическом аппарате. Детализация исходных данных и требуемых результатов соответствуют уровням принятия решений. Для водохозяйственных задач характерны те же сложности, что и для задач управления экономическими системами. Так, приближенными или неопределенными являются почти все экономические параметры (цены, нормативы эффективности и т.п.), а также технологические и другие показатели. Зачастую неизвестна даже степень приближения к реальности многих количественных оценок. Тем не менее, действует «обратная связь» между системой используемых нормативов и разрабатываемыми планами, способствующая повышению обоснованности управленческих решений.

Вопросы использования водных ресурсов тесно связаны с проблемой охраны их от загрязнения и истощения, однако традиционным является разделение этих исследований. Причиной такого разделения, по-видимому, является стремление упростить и без того весьма сложную и многоплановую проблему и рассматривать лишь наиболее сильно взаимосвязанные факторы, фиксируя некоторым неформальным образом оставшиеся параметры. Водоохранные мероприятия рассчитываются на фиксированный речной сток, обеспеченный с высокой степенью надежности. Например, согласно правилам охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами [Правила охраны поверхностных вод....., 1975] расчетным расходом воды для незарегулированных рек следует считать наименьший среднемесячный расход воды 95% обеспеченности.

¹ Публикуется впервые. Выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-17-0062).

Оптимизационные модели (детерминистические или вероятностные, линейные или нелинейные и пр.) позволяют оценить стоимость мероприятий и зависимость качества очищенной сточной воды от капитальных и эксплуатационных затрат и отбраковать заведомо неперспективные варианты. Далее анализируются доступные по публикациям исследования задач охраны вод, которые не включают рассмотрение производственных процессов. Объединение производственных и природоохранных проблем в единую задачу теоретически возможно, см., например, [Pryazhinskaya, Khranovich, 1979; Пряжинская, Рикун, 1988]. Однако неизвестно случаев практического использования подобных моделей в силу трудности совместного описания разнородных производственных процессов, а также сложности формирования качественно различных производственных функций. Имитационные математические модели описывают зависимости между показателями состояния водных объектов и внешнего воздействия на них при различных гипотезах о характере загрязнения.

Обзор работ по оптимизации водоохранных мероприятий

Водные объекты подвергаются комплексному воздействию всех видов загрязнения, однако реально управляемы лишь точечные источники, хотя разделение источников ЗВ на точечные и неточечные в некоторой степени условно и определяется обычно масштабом объекта. Прежде всего, трактуются как точечные источники отдельные предприятия, для которых сбросы ЗВ оцениваются количественно формами отчетности «2ТП-Водхоз». В качестве точечного источника в масштабе крупного речного бассейна могут рассматриваться и отдельный город, и административная единица. ЗВ от неточечных источников трудно персонифицировать отдельному предприятию или локальному объекту и формализовать соответствующие процессы.

Воздействие точечных источников на любом участке реки определяется величинами сбросов «привязанных» к нему предприятий, а также возможностями самоочищения реки. На каждом предприятии может быть реализована какая-либо одна из допустимых технологий очистки, что отражается введением в постановку задачи целочисленных переменных. Модели формулируются для каждого

уровня «крупности» речных бассейнов с разной степенью агрегирования параметров и исходных данных. Система взаимодействующих математических моделей большой размерности в пределах крупного речного бассейна связана единой технологической, технической и информационной базой. Различные приемы агрегирования позволяют снизить размерность, в частности, путем разбиения проблемы на отдельные задачи, каждая из которых характеризуется определенной детальностью принятия решений, а также целевым назначением объекта (административная или хозяйственная территория, речной бассейн или участок реки). Основная трудность реализации моделей состоит в обеспечении информацией решаемых задач, т.к. количество ЗВ и число вариантов возможных очистных сооружений с их параметрами огромно. Поэтому принципиальную важность имеют процессы согласования решений частных задач.

Начало соответствующих исследований соотносится с шестидесятыми годами двадцатого столетия, прежде всего в промышленно развитых странах Запада и США. В России работы по оптимальному планированию мер по охране вод появились в начале и продолжались в течение семидесятих годов [Вавилин, Циткин, 1977; Гордин и др., 1979; Кузин, Станишевский, 1978 и др.]. Работы зарубежных ученых этих лет [Water quality for river..., 1977; Stephenson, 1978] и др. В последующие годы проблематика становится традиционной и соответствующим исследованиям посвящаются как отдельные упомянутые статьи, так и монографии [Математические модели контроля загрязнения воды, 1981; Гютков, 1985; Рикун и др., 1991; Цхай, 1995; Математическое моделирование в управлении водными ресурсами, 1988; Родзиллер, 1984; Пряжинская, Ярошевский, Левит-Гуревич, 2002; Revelle, Loucks, 1967; Кочарян, Хранович, 1989; Имитационное моделирование, 1989; Шнайдман, 1991; Бик, Лаукс, 2009; Готовцев, 2010; Данилов-Данильян, Пряжинская, 2013; Пряжинская, 1985; 1998; 2013] и др.

С 1970-х годов развиваются модели межотраслевого баланса с включением в них показателей природоохранной «отрасли». В работе В. Леонтьева и Д. Форда [1972] балансовая модель отраслевой структуры на макроуровне содержит оценку влияния природоохранных затрат на выпуск конечного и валового продуктов, на уровни цен и др. В более поздних моделях [Рывкин и др., 1979;

Данилов-Данильян, Рывкин, 1980] учитывается пространственное распределение затрат и природоохранных нормативов, зависимость затрат на очистку сточных вод от концентраций в них ЗВ и пр.). Информационное обеспечение моделей макроуровня включает параметры процессов формирования возвратных вод и их обезвреживания (например, Рюмина [1980], Кудрявцева [2008] и др.).

Другой класс водоохранных моделей – это модели рационального использования водных и земельных ресурсов, включающие уравнения процессов загрязнения природных вод биогенными элементами и эродированными почвами [Пряжинская – 2006; Цыгуткин и др., 1988]. С развитием ВХС и ростом числа зарегулированных рек обострились как проблемы обоснования способов очистки сточных вод, так и задачи управления санитарными попусками из водохранилищ и обоснование работы накопителей сточных вод [Пряжинская, 2010].

Задачи, ориентированные на снижение массы сбросов ЗВ в водные объекты от сосредоточенных источников, ориентированы на достижение нескольких стратегических целей:

- Реализация лучшей доступной технологии производства и способов очистки сточных вод на каждом крупном предприятии (или группе однотипных предприятий), При этом в состав планируемых в НДТ мероприятий входит замена оборудования, строительство новых сооружений, создание установок по очистке выбросов и сбросов.
- Выявление экономически рентабельных технологий.
- Финансирование природоохранной деятельности за счет платежей за водные ресурсы и сбросы ЗВ.
- Аккумуляция в прудах – накопителях неочищенных или недоочищенных сточных вод и их сброс в водные объекты в многоводные периоды.
- Увеличение разбавляющей способности водотоков за счет специальных попусков из водохранилищ.
- Обработка и утилизация осадочных илов, сопутствующих каждому способу очистки сточных вод.

В математических моделях, относящихся к диффузным источникам загрязнения, описание гидрологических процессов дополняется различного типа моделями формирования и переноса ЗВ [Haith,

1984; Имитационное моделирование...., 1989; De Coursey, 1990; Novotny, Olem, 1994; Пряжинская, Васильченко, 2006].

Региональные математические модели оптимизации способов очистки сбросных вод, компоненты которых регистрируются системой статистической отчетности "2ТП-Водхоз", базируются на балансовых моделях качества воды и в агрегированном виде формулируются, как [Пряжинская, 2010]:

$$\{\min \bar{K}_\varepsilon / A_\varepsilon \leq B\}, 0 \leq \varepsilon \leq 1, \quad (1)$$

где \bar{K} – приведенные капитальные затраты на очистку, A – матрица технико-экономических и прочих коэффициентов, B – вектор ресурсных ограничений, компоненты искомого вектора ε обозначают включенные в рассмотрение технологии очистки сточных вод.

Качество воды водного объекта оценивается с помощью уравнений кинетики первого порядка. В разрешенной форме уравнение, описывающие процесс распада ЗВ через концентрации C как функции времени t имеет вид

$$C = C_0 e^{-kt} = C_0 e^{-kt/V}, \quad (2)$$

где C_0 – концентрация в головной части (на входе) участка водотока, k – коэффициент распада (уменьшения) ЗВ, L – длина участка, V – средняя скорость течения.

Комплексные решения в области водохозяйственного планирования представлены работами [Косолапов, 1996; Лотови др., 1998; Пряжинская, Васильченко, 2006].

Помимо задач выбора технологий очистки сточных вод актуальны также проблемы организации санитарных попусков из водохранилищ, а также сооружения прудов – накопителей сточных вод [Пряжинская, 2010].

Математический аппарат поддержки решений

Помимо моделей типа (1) для выбора состава очистных сооружений [Кузин, Станишевский, 1978; Пряжинская и др., 2002 и др.] разработаны современные компьютерные средства, которые существенно расширяют возможности математического моделирования и визуализации результатов по обоснованию стратегий улучшения качества вод. Так, метод достижимых целей [Лотов и др., 1997] позволяет находить эффективные стратегии из набора решений, получаемых на базе моделей типа (1), на базе графического анализа сочетаний

достижимых значений критериев и кривых их эффективного замещения. Вместо обработки множества альтернативных оптимальных планов пользователь сравнивает карты решений, скомпонованные в матрицу, анализирует взаимовлияние различных используемых критериев и выбирает вариант, предпочтительный по стоимости очистки и состоянию качества воды водного объекта.

Подготовка необходимых исходных данных и их организация – затратные и трудоемкие процессы. Тем не менее, экономия средств на реализацию водоохраных мероприятий может быть значительной за счет оптимизации распределения капиталовложений, так как «цена» ошибок традиционного (без использования методов оптимизации) стратегического планирования всегда высока. Так, в работе [Рикун и др., 1991] показано, что эффект от оптимизации при выборе структуры ВХС может достигать 40% капитальных затрат. На этапе проектирования отдельных элементов систем (плотин, дамб, коллекторно-дренажной сети) оптимизация водохозяйственных решений дает экономию около 8–12% общих затрат, а оптимальные режимы функционирования проектируемой системы экономят 3–7% эксплуатационных затрат.

Экономические методы управления охраной вод заключаются в выделении той части платы, взимаемой за загрязнение природной среды, которую рационально вернуть предприятиям-загрязнителям для частичной компенсации затрат на реализацию ими водоохраных мероприятий. Успех использования экономических методов достижим при децентрализации управления, организованного по бассейновому принципу, в условиях независимости управляющих органов и активном участии общественности в обсуждении соответствующих документов. Одна из форм организации рационального водопользования в современных условиях – специальные соглашения для крупных речных бассейнов между органами управления водными ресурсами и местными органами власти. Бассейновые соглашения позволяют регламентировать процессы водопотребления, водоотведения и сбросов ЗВ и обеспечивают определенные гарантии для договаривающихся сторон.

Актуальны для исследования и не формализуемые аспекты проблемы (организационные, правовые, финансово-экономические), так как их состояние существенно влияет на процессы выбора матема-

тического аппарата и постановку задач планирования регионально-го водопользования.

Привлечение внимания специалистов к методам экономического стимулирования водоохраной деятельности происходит по ряду причин. В частности, многие специалисты считают, что правильное применение экономических стимулов может значительно уменьшить затраты на достижение стандартов качества природных вод; а переход от централизованного планирования к свободному рынку увеличивает значимость экономических стимулов; ЛПР и правительственные органы рассматривают тарифы, различные платежи и штрафы как важный потенциальный источник дохода, который может быть использован как для проектов улучшения окружающей среды, так и для других хозяйственных нужд.

Простейший способ отражения в математических моделях экономических механизмов – введение в целевую функцию штрафов за нарушение норматива ПДК по определенному ЗВ в конкретном створе. Такое нарушение допустимо только в пределах временно согласованных значений концентраций и за такое нарушение взимается штраф, пропорциональный величине нарушения.

Вопросам построения математических моделей прогноза качества речных вод посвящены многие сотни публикаций и обзорных статей. В частности, достаточно полные обзоры представлены в статье [De Coursey, 1990], в соответствующих разделах монографий [Пряжинская, Ярошевский, Левит-Гуревич, 2002; Родзиллер, 1984; Моделирование..., 1992] и др. Модели качества воды описывают пространственные и временные изменения рассматриваемых компонент в водном объекте, происходящие в силу конвективного или диффузного переноса, а также химических и биологических реакций.

Качество воды в выделенных створах реки оценивается до и после строительства очистных сооружений для оценки реакции водного объекта на планируемые мероприятия и выявления потребности в них. Сошлемся на работу [Готовцев, 2010], в которой процесс переноса массы ЗВ при стационарном течении воды в русле с учетом неточечных источников, равномерно распределенных вдоль русла, описывается уравнением вида $V \frac{dZ}{dx} = -k_1 \cdot Z + w \cdot V$, где x – расстояние по длине от начального створа ($x=0$ в начальном, $x=L$ – в

Алгоритм расчета антропогенной нагрузки

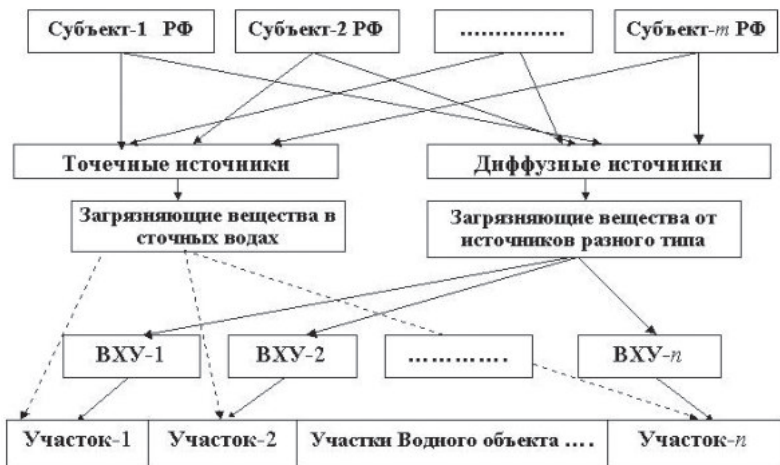


Рис. 1. Алгоритм расчета антропогенной нагрузки для крупного речного бассейна (конечном створах участка русла); Z – расход массы ЗВ через поперечное сечение русла; V – скорость переноса ЗВ; k_1 – коэффициент скорости распада ЗВ; w – распределенный по длине русла приток загрязнений (модуль диффузного стока ЗВ).

Антропогенная нагрузка на сельскохозяйственные водосборы

Загрязнение водосборных территорий сельскохозяйственного назначения часто обусловлено несовершенством организации землепользования. Выделить при этом единственный сценарий действий для нейтрализации воздействия неточечных источников загрязнения затруднительно, а зачастую и невозможно, так как концентрация ЗВ в принимающих водах с территории водосбора увеличивается с ростом интенсивности поверхностного стока. Масса выноса ЗВ с сельскохозяйственных водосборов описывается уравнением вида $U=M \cdot S \cdot C[1-\exp(-kH)]$, где: U – масса выноса ЗВ; S – почвенно-морфологический параметр; M – содержание химиката в корневой зоне; H – гидрологический параметр; C – технологический параметр; k – константа переноса распада вещества [Wish.Smith-1978; Цигуткин и др., 1988]. Алгоритм расчета антропогенной нагрузки

представлен на рис. 1, где «базовыми» водосборными территориями служат субъекты РФ или их части, формирующие соответствующие гидрологически обусловленные ВХУ.

Можно выделить ряд позиций, характеризующих неточечные источники загрязнения водных объектов и способы их нейтрализации с использованием наилучшей практики управления (НПУ) [Novotny, Olem 1994; Пряжинская, Васильченко, 2006]:

- ЗВ в наносах (взвешенные вещества, мутность воды). НПУ – покрытие почвы дерном или засев травой стоковых поверхностей, защитное оконтуривание животноводческих комплексов, правильная эксплуатация пастбищ.
- Биогенные вещества – азот, фосфор (при их избытке интенсивно зарастают водохранилища, понижается содержание растворенного кислорода). Методы НПУ: – сооружение участков складирования отходов, ротация культур, компостирование отходов и пр. Организация повторного использования возвратных оросительных и дождевых вод, создание защитных буферных зон, емкостей для компостов.
- Бактерии, вирусы. НПУ – защитные буферные зоны, замкнутые циклы водопользования, дозированное применения навоза при удобрении и подкормке растений.
- Металлы. НПУ – искусственные микробиологические фильтры, сведение к минимуму применения металлосодержащих материалов.
- Соли. НПУ – сооружение испарительных бассейнов, замена каналов на трубы, внедрение капельного орошения и пр.
- Пестициды и др. токсины. НПУ – минимизация маршрутов перемещения и разгрузки ЗВ, организация террас и прудов-накопителей с системой замкнутого и повторного водопользования.

Интенсивность негативных воздействий площадного загрязнения сокращается при перестройке устаревших приемов землепользования.

Новые факторы загрязнения водных объектов

С развитием производства появились новые потенциально опасные ЗВ, в частности, ксенобиотики. Недостаточность и несовершенство

тво мониторинга, а также нормативной базы, которая включает лишь такие показатели как ПДК, Госты и СанПины на небольшое количество ксенобиотиков, обусловили необходимость обоснования соответствующих экономических и нормативных методик оценки эффективности соответствующих водоохраных мероприятий. Внимания требует выявление особенностей правового положения водных объектов, подверженных воздействию загрязняющих веществ нового типа, особенно в условиях, когда объем инвестиций в модернизацию объектов коммунальной инфраструктуры не соответствует минимальным ее потребностям.

По функциональному назначению ксенобиотики объединяют распространенные ЗВ химического происхождения, включая агрохимикаты кроме пестицидов (органические удобрения; ростовые вещества и др.); пищевые добавки синтетического происхождения; вещества исключительно или преимущественно промышленного назначения (синтетические красители, буровые растворы, пенообразователи, эмульгаторы и др.); ядовитые вещества, целенаправленно созданные для уничтожения человека, животных, растений; химические энергоносители (нефть, газ, газовый конденсат) и др. Ксенобиотики присутствуют, в частности, в осадочных илах, которые образуются при разных способах очистки хозяйственно-бытовых сточных вод, содержащих такие вещества как нефтепродукты, фенолы, органические вещества, а также кадмий, медь, хром, ртуть и др. При очистке илов в анаэробных условиях в септиках осадок уменьшается в объеме наполовину.

Развиваются и более сложные методы очистки илов такие, например, как осушение или сжигание, которые по стоимости могут превышать затраты на очистку сточных вод, а величина произведенного ила становится ключевым фактором процесса, инициирующим развитие технологий очистки с сокращенным производством осадочных илов [Пряжинская, Покидышева, 2010]. В табл. 1 представлен типичный для Восточной Европы уровень содержания металлов в осадочных илах (при слабой промышленной нагрузке на сточные воды) [Henz Odeg. 1995].

Учет затрат на очистку осадочных илов может привести к необходимости пересмотра постановки исходной задачи обоснования способов очистки сточных вод и повторного ее решения, что при-

Содержание металлов в осадочных илах

Компонент	Механическая очистка	Химическая очистка	Биологическая очистка	Биохимическая очистка
Кадмий	5–10	4–8	5–10	6–12
Медь	100–200	80–160	150–300	200–400
Хром	50–100	30–60	75–150	100–200
Свинец	200–300	150–300	175–350	200–400
Ртуть	4–10	2–6	3–8	4–10
Никель	30–80	20–60	20–60	30–100
Цинк	1500–3000	1000–2000	1500–3000	2000–4000
Азот (г/кг DS)	20–40	12–25	20–50	15–40
Фосфор (г/кг DS)	5–10	20–50	15–40	20–50
Калий (г/кг DS)	2–4	1,5–3	2–4	1,5–3
VDS/DS1*	60–80	40–60	50–60	40–60

нципиально меняет подход к методологии решения проблемы улучшения качества природных вод.

Управление качеством воды в бассейне р. Волги

Волжский бассейн включает частично или полностью территорию 39 субъектов Российской Федерации. Там проживают до 40% населения России, производится 45% промышленной и 50% сельскохозяйственной продукции, расположено 38% сельскохозяйственных площадей страны.

При формировании задачи управления качеством воды р. Волги использовано гидролого-административное районирование водосборной территории (в качестве расчетной «единицы» принята территория субъекта РФ). Применены агрегированные показатели затрат на водоохранные мероприятия. Сточные воды контролируются по шести компонентам: биохимическому потреблению кислорода (БПК), нефтепродуктам, взвешенным веществам, общему фосфору и азоту, а также железу. Рассматривались пять способов очистки: механическая, химическая, биологическая, биохимическая и биохимическая с удалением азота. Методом прямого счета проанализированы варианты реализации одного и того же способа очистки, как пример прямого директивного управления.

Создание каскада ГЭС и водохранилищ привело к значительному снижению скорости движения воды в реке, образованию боль-

ших площадей мелководий. В результате усилилась бактериальное загрязнение воды, т.к. в слабопроточных зонах водохранилищ скорость течения воды составляет менее 0,01–0,03 м/сек. Источники загрязнения предполагаются стационарными, т.е. ЗВ поступают равномерно в течение года, хотя в бассейне р. Волги смывы с водосборных площадей происходят лишь в периоды весеннего половодья и дождевых паводков. Во время зимней межени, когда река покрыта льдом, и в периоды глубокой летне-осенней межени, не прерываемой дождевыми паводками, ЗВ поступают в реку исключительно от сосредоточенных источников и (или) с подземными водами. Но это соображение бесспорно для бассейнов малых и средних рек, где можно пренебречь временем добегания воды. На р. Волге время добегания от верховьев до устья измеряется месяцами, и соображение об отсутствии влияния неточечных источников загрязнения на качество вод в период летней межени становится проблематичным.

Объем сбросных вод в разрезе субъектов РФ и массы сбросов БПК, взвешенных веществ, нефтепродуктов, железа, общего азота и фосфора оценены по данным форм 2 ТП-Водхоз. Технико-экономические показатели разных способов очистки (механическая, биологическая, физико-химическая и др.), включая эффективность каждого из них, а также удельные капитальные и эксплуатационные затраты приняты по зарубежным литературным источникам [Henze, Odegaard, 1995; Zessner et al, 1998] (табл. 2).

В бассейне р. Волги лишь 10–15% сточных вод обеспечиваются очисткой до нормативного качества. Большая часть очистных сооружений не способна обеспечить очистку до необходимого уровня по причине физического и морального износа, несоответствия технологии очистки составу сточных вод и составу загрязнителей в сточных водах. В период значительного спада производства во всех сферах национального хозяйства объем загрязнений, поступающих в окружающую среду, значительно сократился. Однако адекватного снижения концентраций ЗВ в воде р. Волги и ее притоках не наблюдается. С одной стороны, это обусловлено резким снижением эффективности работы локальных очистных сооружений промышленных предприятий из-за отсутствия материальных ресурсов. С другой стороны, это следствие ресурсорасточительной и энергоемкой хозяйственной деятельности.

Таблица 2.

**Концентрации очищенной воды для различных альтернатив
обработки сточных вод**

Способ очистки сбросных вод	БПК		ВВ		Общ. Р		Общ. N		НФТПр		Fe	
	г/м ³	% уд.	г/м ³	% уд.	г/м ³	% уд.	г/м ³	% уд.	г/м ³	% уд.	г/м ³	% уд.
Первоначальная сточная вода	150	0	150	0	7,5	0	30	0	10	0	100	0
Механическая Очистка	105	30	60	60	6,5	6,7	25	17	4,0	60	70	30
Химическая очистка: СЕМТ (1)	75	50	30	80	2,5	67	23	25	3,3	67	67	33
Первичное осаждение (2)	45	70	15	90	0,8	90	21	30	3,0	70	65	35
Биологическая очистка: Высокая нагрузка (3)	45	70	30	80	5,3	30	23	25	2,5	75	60	40
Низкая нагрузка (4)	20	87	15	90	5,3	30	21	30	2,5	75	60	40
Биол./химическая очистка Одновременное осаждение	20	87	20	87	1,0	80	20	33	1,5	85	50	50
Первичное осаждение	10	94	15	90	0,5	94	20	33	1,5	85	50	50
Биол/химич/N – удаление: Предденитрификация/Одновременное осаждение	10	94	10	94	1,0	80	10	67	1,0	90	33	67
Предденитрификация/первичное осаждение	5	97	10	94	0,5	94	5	88	0,6	94	33	67

В таблице 3 представлены в безразмерном виде использованные при расчетах приведенные капитальные, а также эксплуатационные затраты и суммарная приведенная стоимость [Zessner et al, 1988].

В качестве критериев оптимизации использованы:

- минимизация приведенных затрат (при заданных ограничениях на суммарные массы сбрасываемых загрязняющих веществ);

Относительные стоимости очистки сточных вод

Процесс обработки	Приведенные капитальные затраты, ЕНК	Эксплуатационные затраты, Э	Суммарная приведенная стоимость, ЕНК+ Э
Механическая очистка	0,71	0,6	1,31
Химическая Очистка: СЕМТ	0,78	0,9	1,68
Биологическая очистка: Высокая нагрузка	1,0	1,0	2,0
Биол/химическая очистка Однов. Осаждение	1,0	1,3	2,3
Биол/химич/N – удаление: Предденитрификация/ однов.осаждение	1,88	1,9	3,78
Постденитрификация/ первичное осаждение	1,5	2,0	3,5

- минимизация массы сбрасываемых загрязняющих веществ (при ограниченных капиталовложениях на строительство очистных сооружений).

Результаты расчетов приведены в табл. 4. Одна из стратегий водоохранной деятельности реализует прямое директивное управление, при котором ставится условие повсеместного использования одного и того же способа очистки. Здесь при механической очистке объем сброса БПК сократился на 70%, железа – почти вдвое, а нефтепродуктов – в 3 раза. При обязательном переходе от механического к биологическому способу очистки капиталовложения и приведенные затраты увеличатся примерно на 60%, а сбросы железа сократятся на 15%, нефтепродуктов на 40%, БПК – в 2.5 раза. Концентрации БПК при этом за счет точечных источников практически во всех контрольных створах сократятся более чем вдвое.

В табл. 5 представлены показатели оптимальных планов, в каждом из которых выбраны сочетания разных способов очистки, соответствующих пяти разным вариантам сокращения сбросов масс БПК.

Сравнение представленных результатов показывает следующее сокращение сбросов сточных вод (по вариантам): 1) на 62%; 2) более

Таблица 4

**Затраты на очистку сбросных вод и эффективность очистки
(директивное управление)**

Показатели Объемы сбросов, тыс. т	Неочищенные сбросы	Способы очистки			
		Меха- ни- ческая	Биоло- ги- ческая	Биохи- ми- ческая	Физико- хими- ческая
БПК	360,0	250,0	109,0	36,0	18,0
Железо	40,0	28,0	24,0	20,0	13,0
Нефтепродукты	18,0	7,0	4,5	2,3	1,8
Капиталовложения, %	–	100	162,6	152,0	256,0
Приведенные затраты, %	–	100	160,0	180,0	273,3

Таблица 5

**Затраты на очистку сбросных вод по БПК и массы сбросов ЗВ
в оптимальных планах**

Показатели	Неоч. сбросы	Варианты расчетов				
		1	2	3	4	5
Объемы сбросов БПК, тыс. т	360,0	224,0	100,0	50,0	40,0	20,0
Капиталовложения, %	–	100,0	108,5	126,8	132,9	170,7
Приведенные затраты, %	–	100,0	115,6	143,7	156,2	200,0

чем втрое; 3) в 7 раз; 4) в 9 раз; 5) в 18 раз. Среди способов очистки преобладают – механическая, биологическая и биохимическая. при этом, принимая капитальные затраты варианта 1 за 100%, получаем в вариантах 2–5 их увеличение со 108,5 до 170,7%, а приведенных затрат – с 115,6% до 200%. таким образом, приведенные затраты возрастают быстрее чем капитальные при углублении степени очистки сточных вод с 30% до 95%.

Получены и такие показатели, как распределение затрат на осуществление водоохранных мероприятий по отдельным регионам или административным единицам. Так, в соответствии с одним из оптимальных планов при снижении массы сбросов БПК на $\frac{1}{3}$ предпочтительны методы биологической и биохимической очистки примерно на 60% предприятий. Установлены также приоритеты инвестирования водоохранной деятельности в бассейне. Оказалось, что распределение капиталовложений на реализацию мероприятий по охране вод среди областей и республик соответствует, в

основном, выполненному внемодельно ранжированию административных единиц в бассейне р. Волги по их суммарной антропогенной нагрузке на водные объекты.

В целом результаты расчетов позволили установить приоритеты инвестирования водоохранной деятельности на отдельных ВХУ в бассейне. Для сравнительно небольших притоков II-го, III-го порядка на речной сети в модель оптимизации включаются характеристики крупных загрязняющих производств, их сбросных вод и способов очистки. Обоснование типов очистных сооружений на подобных предприятиях базируется на моделях частично-целочисленного программирования. Подобная модель была реализована для условий бассейна р. Прони (правый приток р. Оки) [Пряжинская, 1996].

Заключение

Математический аппарат методической поддержке решений по управлению качеством природных вод отражает структуру ВХС и таких ее элементов как водохранилища, промышленные предприятия, орошаемые массивы и т.д. Модели принятия решений в области охраны вод ориентированы не только на определение характеристик альтернативных вариантов очистных сооружений, но и показателей перспективных схем технологического водопользования, внедрение которых может коренным образом изменить объем и состав сбросных вод. Основная трудность реализации оптимизационных моделей состоит в обеспечении информацией задач большой размерности.

Для организации рационального водопользования в современных условиях актуально заключение специальных соглашений для крупных речных бассейнов. Эти специфические для каждого бассейна согласительные документы между органами управления водными ресурсами и местными органами власти позволяют регламентировать процессы водопотребления, водоотведения и сбросов ЗВ, обеспечивая определенные гарантии договаривающимся сторонам.

Применение методов экономического стимулирования водоохраной деятельности может значительно уменьшить затраты на достижение стандартов качества природных вод и ускорить переход от централизованного планирования к свободному рынку, включающему установление тарифов, различных платежей и штрафов.

Несовершенство организации землепользования приводит к загрязнению сельскохозяйственных водосборных территорий. Сокращение воздействий этого типа источников требует экономического обоснования и достижения компромиссов в разных общественных структурах.

С развитием производительных сил появились новые загрязняющие вещества, в частности, ксенобиотики химического происхождения и необходимость обоснования соответствующих экономических и нормативных методов оценки эффективности проводимых мер по охране от загрязнения водных объектов этими потенциально опасными веществами. В силу недостаточности и несовершенства мониторинга, а также нормативной базы внимания требует выявление особенностей правового положения водных объектов, подверженных воздействию загрязняющих веществ нового типа, особенно в условиях, когда объем инвестиций в модернизацию объектов коммунальной инфраструктуры не соответствует минимальным ее потребностям.

Возможности снижения сбросов ЗВ в Волжском бассейне оценивались только через строительство или реконструкцию очистных сооружений, т.к. отсутствуют существенные разделы информации о состоянии водопользования. Оптимизационные расчеты на частично условной информации позволили обосновать способы очистки сточных вод и получить показатели распределения затрат на осуществление мероприятий по отдельным регионам или административным единицам бассейна реки. Установлены приоритеты инвестирования водоохранной деятельности в бассейне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилин В.А., Циткин Ю.Б. Математическое моделирование и управление качеством водной среды // Водные ресурсы. 1977, №5. С. 114–132.
2. Гордин И.В., Кочарян А.Г., Воробьева Н.П., Жиркевич А.Н., Новожилов А.П., Дорохова С.И., Матыцина Е.И. Оптимизация системы водоохраных мероприятий. // Водные ресурсы. 1979. №5. С. 125–136.
3. Готовцев А.В. Модификация системы Стритера-Фелпса с целью учёта обратной связи между концентрацией растворённого кислорода и скоростью окисления органического вещества // Водные ресурсы, 2010, том 37, №2. С. 250–256.
4. Данилов-Данильян В.И., Рывкин А.А. Глобальное моделирование // Экономическая энциклопедия. Полит. экономия: В 4 т. Т. 4. М.: Сов. энциклопедия, 1980. С. 613–618.

5. Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В.Г. Методы обоснования мер по охране вод. Фундаментальные проблемы пространственного развития Российской Федерации: международный синтез / РАН; отв. ред. акад. В.М. Котляков. – М.: Медиа-Пресс. 2013. С. 114–119.

6. Имитационное моделирование системы «водосбор–река–морской залив». /под ред. В. Крысановой и Х. Луйка. Таллинн: ВАЛГУС. 1989. 428 с.

7. Косолапов А.Е. Совершенствование процесса управления водными ресурсами бассейна реки на основе автоматизированных информационно-советующих систем: Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург: 1996. 50 с.

8. Кочарян А.Г., Хранович И.А. Поточная модель обоснования параметров элементов и водоохраных мероприятий водохозяйственной системы // Водные ресурсы. 1989. №6. С. 146–157.

9. Кузин А.К., Станищевский С.А. Оптимизация степени очистки сточных вод по речному бассейну // Водные ресурсы. 1978, №2. С. 143–157.

10. Кудрявцева О.В. Учет потоков природных ресурсов и межотраслевой баланс как средства осуществления ресурсосбережения и анализа экологической эффективности мероприятий. М.: ТЕИС. 2007. 191 с.

11. Леонтьев В., Форд Д. Межотраслевой анализ воздействия структуры экономики на окружающую среду // Экономика и мат. методы. 1972. т. 8, вып. 3. С. 370–390.

12. Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К., Черных О.Л. Компьютер и поиск компромисса. Метод Достижимых Целей. М.: Наука. 1997. 320 с.

13. Математические модели контроля загрязнения вод. М.: Мир, 1981. 471 с.

14. Математическое моделирование в управлении водными ресурсами / Под ред. В.Г. Пряжинской. М.: Наука. 1988. 247 с.

15. Мороков В.В. Природно-экономические основы регионального планирования охраны рек от загрязнения. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 286 с.

16. Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами. М.:1975. 38 с.

17. Пряжинская В.Г. Методы оценки экологии водных объектов (модель рассредоточенных источников загрязнения) // Инженерная Экология. 1998. №2. С. 2–14.

18. Пряжинская В.Г., Рикун А.Д., Общая схема учета в моделях стохастичности стока и естественного увлажнения // В кн.: Математическое моделирование в управлении водными ресурсами. М.: Наука, 1988. С. 45–50.

19. Пряжинская В.Г. Методы управления водопользованием в России // В сб.: Государственное управление в XXI веке: повестка дня российской власти. X Международной научной конференции ФГУ МГУ им. М.В. Ломоносова. Часть 2. 2013. М.: Издательство Московского университета, 2013. С. 440–453.

20. Пряжинская В.Г. Математическое моделирование в водном хозяйстве. – М.: Наука. 1985. 112 с.

21. Пряжинская В.Г. Современные методы управления качеством речных вод урбанизированных территорий //Водные ресурсы, 1996, Том 23, №2, С. 168–176.

22. Пряжинская В.Г., Ярошевский Д.М., Левит-Гуревич Л.К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 496 с.

23. Пряжинская В. Г. Защита речных вод от сельскохозяйственных загрязнений // В кн.: Обоснование стратегий управления водными ресурсами. М.: Научный мир. 2006. С. 217–224.

24. Пряжинская В.Г. Методы и модели планирования водоохраных мероприятий // В кн.: Водные ресурсы и качество вод: состояние и проблемы управления, М: РАСХН, 2010, С. 247–266.

25. Пряжинская В. Г., Покидышева И.В. Техничко-экономические аспекты планирования очистки сточных вод // Водные ресурсы и качество вод: состояние и проблемы управления. М.: РАСХН, 2010. С. 305–309.

26. Рикун А.Д., Черняев А.М., Ширяк И.М. Методы математического моделирования в оптимизации водохозяйственных систем промышленных регионов. М.: Наука, 1991. 160 с.

27. Родзиллер И.Д. Прогноз качества воды водоемов – приемников сточных вод. М.: Стройиздат. 1984. 265 с.

28. Рывкин А.А., Амиров И.Ш., Лопухин В.М. О проекте «Будущее мировой экономики» // Экономика и математические методы. 1979. Т. 15. Вып. 2.

29. Рюмина Е.В, Экологический фактор в экономико-математических моделях. – М.: Наука, 1980. 166 с.

30. Тютков О.В. Оптимизация планирования водного хозяйства промышленных районов. М.: Наука, 1985. 119 с.

31. Цигуткин С.Г., Бондаренко Л.М., Блешинская Л.С., Редченко Е.Б. Методика оценки выноса с сельскохозяйственных угодий биогенных веществ и пестицидов. //Рациональное использование и охрана мелиорируемых земель, 1988, М.: Изд-во ВНИИГИМ. С. 63–87.

32. Цхай А.А. Мониторинг и управление качеством вод речного бассейна (модели и информационные системы). – Барнаул: Алтайское книжное издательство, 1995. 175 с.

33. Шнайдман В.М. Имитационная модель управления каскадом водохранилищ //Вод. ресурсы. 1991. №3. С. 168–175.

34. Cann C. Effect of various parameters on nitrogen concentration in surface water // Proc. Second Inter. IAWQ Spec. Conf. Fna Symp. Diffuse Pollution. Brno & Prague, Czech Rep., Aug. 13–18, 1995 / V. Chour and M. Holasova, eds. – Praha: Agrodats, a.s., 1995. P. 263–268.

35. De Coursey D.G. Integrated quantity/quality modeling// recent advances in modeling of hydrologic systems, 1990, Rluwer Academic Publishers. Dordrecht, the Netherlands. P. 208–236.

36. Economic Instruments for Environmental Protection. – Paris: OECD-Report, 1989. 131 p.

37. Dabrowski J.M., Peall S.K.C., Niekerk A.V., Reinecke A.J., Day J.A., Schulz R. Predicting runoff-induced pesticide input in agricultural sub-

catchment surface water: linking catchment variables and contamination // Water Research. 36 (2002). Pp. 4975–4984.

38. Haith D. A. Environment Systems Optimization, N.Y. 1984. 290 p.

39. Haith D.A., Tubbs L.J. Watersheds Loading Function for Nonpoint Sources. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of Environmental Engineering Division, 1981, n107, v. ee1, P. 121–137.

40. Henze M, Odegaard H. Wastewater treatment process development in Central and Eastern Europe – strategies for a stepwise development involving chemical and biological treatment in: Remediation and Management of Degraded River Basins, ed. V. Novotny & L. Somlyódy, 1995, Springer-Berlin, NATO ASI Series, 2. Environment. vol. 3. pp. 357–384.

41. Modeling of water quality in hydrological cycle: Proc. of Baden symp., Sept. Baden. 1978.

42. Novotny V., Olem H. Water quality. Prevision, Identification, and Management of Diffuse Pollution. – New York: Van Nostrand reinhold. 1994. 1054 p.

43. Pryazhinskaya V.G. Khranovich I.L. Planning water use and quality control in river basin // Hydrol. Sci. Bull. 1979. Vol. 24, №26. P. 239–247.

44. Revelle C.S. Loucks D.P., Lynn W.R. A management model for water quality control // Jour. Water pollution control Federation, 1967, vol. 39, July №7, Pp. 1164–1184

45. Somlyódy L., Paulsen C.M. Cost-effective water quality management strategies in Central and Eastern Europe. Vienna: IIASA, 1992. WP-92-001. 37 p.

46. Stephenson D. Optimal planning of regional waste water treatment // Modeling of water quality in hydrological cycle: Proc. of Baden symp. Sept. 1978. Baden. P. 351–360.

47. Wade J.C. Heady E.O. Measurement of sediment control impact on agriculture // Water Resour. Res 1978. Vol. 14, №1. P. 1–8.

48. Water quality for river reservoir system: Generalized computer program. Davis (Cal.): Hydrol. Eng. Center. US Army Corps of Eng., 1977.

49. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses. a Guide to Conservation Planning.// Agricultural Handbook, N537, Washington, 1978.

50. Zessner M., Fenz R., Kroiss H. Wastewater management in the Danube basin//Water Sci. Technology. V. 38. №11. 1998. P. 41–49.

Раткович Даниил Яковлевич

(08.3.1926 – 6.10.2008)



Даниил Яковлевич Раткович – крупнейший учёный, один из ведущих специалистов страны в области гидрологии суши, стохастического моделирования речного стока, комплексного использования водных ресурсов, доктор технических наук, профессор, член Американского института гидрологии.

Д.Я. Раткович родился 8 марта 1926 г. в г. Москве. В 1947 г. закончил гидротехнический факультет Московского инженерно-строительного института (МИСИ), по специальности – использование водной энергии. Последний год учёбы в МИСИ

совмещал с работой в гидравлической лаборатории института «ВОДГЕО». По окончании института он был оставлен на кафедре гидравлики и гидромеханизации, где работал до 1950 г. (сначала в должности старшего лаборанта, затем – заведующего лабораторией) и занимался, в основном, вопросами транспорта наносов и русловыми процессами.

В связи с принятием в январе 1950 г. ряда специальных постановлений Совета Министров СССР, стимулирующих строительство и модернизацию гидротехнических сооружений («Великие стройки коммунизма»), Д.Я. Раткович был направлен в распоряжение института Гидропроект МВД СССР, где работал в различных должностях (от старшего инженера до начальника отдела русла и термики) и специализировался в области инженерно-гидрологических и гидравлических исследований. Более десяти лет Д.Я. Раткович посвятил проектным экспедиционным гидрологическим исследованиям, возглавлял гидрологические экспедиции на Амударье, Волге, Куба-

ни, Оби, Или. За этот период им был опубликован ряд методических работ, базирующихся на результатах специальных натуральных исследований грядового движения наносов, в которых изложена, в частности, оригинальная методика анализа их гранулометрического состава. Следует отметить важное для практики исследование отклонения водным потоком гидрологических приборов, опускаемых на тросах, основанное на решении задачи тяжелой гибкой нити на течении.

В 1961 г. Д.Я. Раткович был откомандирован в Государственный комитет по комплексному использованию и охране водных ресурсов (позднее преобразованный в Министерство мелиорации и водного хозяйства РСФСР) и возглавил Управление водных проблем и водохозяйственных балансов. Начиная с 1964 г. участвовал в разработке «Основ водного законодательства» при Комиссии законодательных предложений Верховного Совета СССР.

С января 1965 г. по июнь 1968 г. работал в московской лаборатории водохозяйственных проблем Государственного гидрологического института; с июня 1968 г. зачислен заведующим сектором Института водных проблем АН СССР (далее ИВП РАН), в котором трудился более 40 лет, практически со времени основания Института до окончания своего жизненного пути.

Большой опыт натуральных исследований, полученный Д.Я. Ратковичем в гидрологических экспедициях, оказал существенное влияние на практическую направленность его дальнейших научных исследований. Основным предметом его деятельности была стохастическая гидрология, в частности методология моделирования стохастических процессов, главным образом в приложении к проектной практике.

Особое внимание в исследованиях Д.Я. Ратковича было уделено обоснованию стохастической модели многолетних колебаний речного стока и разработке рекомендаций по её использованию в гидрологических расчётах. В 1972 г. защитил докторскую диссертацию, посвящённую исследованию многолетних колебаний речного стока. Его монография «Многолетние колебания речного стока» (1976 г.) стала классической настольной книгой для гидрологов и других специалистов.

На основе результатов исследований, выполненных А.Н. Колмогоровым, О.В. Сармановым и другими учёными во 2-й половине 20 в.,

Д.Я. Раткович убедительно показал, что речной сток есть не совокупность случайных событий, а вероятностный процесс: скалярный, если рассматривается приток к одному водохранилищу, и векторный, когда речь идёт о притоке к системе водохранилищ. На основе материалов обширных натуральных наблюдений Д.Я. Ратковичем был сделан вывод, что применение цепей Маркова первого порядка для описания элементов водного баланса в ряде случаев достаточно обосновано, однако результаты расчётов зависят и от типа двумерной плотности распределения вероятностей. Задача в такой постановке впервые была сформулирована Д.Я. Ратковичем, им был рекомендован тип двумерного распределения, дающий достаточно близкое соответствие натуре.

Различные варианты марковских моделей многолетних колебаний стока и пространственные закономерности изменения их параметров изложены в работах Д.Я. Ратковича, Е.Г. Блохинова, А.Ш. Резниковского, А.В. Рождественского и других авторов, плодотворно развивавших идеи С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. На основе предложенных подходов к построению двумерных и многомерных законов распределения случайных величин были решены важные прикладные гидрологические и водохозяйственные задачи.

Вероятностные представления об изменчивости гидрометеорологических процессов, существенно развитые Д.Я. Ратковичем, стали основой теории колебания уровня замкнутых водоёмов. Возможность применения указанных вероятностных методов показана на примере прогнозирования уровня Каспийского моря.

За годы работы в Институте водных проблем Д.Я. Раткович стал одним из ведущих специалистов страны в области комплексного использования водных ресурсов; им опубликовано более 100 работ, из них 5 монографий, получивших заслуженное признание учёных и специалистов в нашей стране и за рубежом. Опубликованные работы относятся к теории гидрометрии; русловым процессам на реках, каналах, водохранилищах; теории многолетних колебаний речного стока и методов его регулирования; вероятностному описанию сезонного хода гидрометеорологических процессов; исследованиям уровня и солевого режима внутренних водоёмов; научным аспектам проблемы водообеспечения страны. Широко известны разработанные Д.Я. Ратковичем предложения по решению

крупных комплексных водохозяйственных проблем страны; он придавал большое значение необходимости совместного решения гидрологических и экологических задач.

В числе наиболее значимых работ Д.Я. Ратковича можно отметить следующие: Раткович Д.Я. Стохастическая модель колебаний годового стока рек // Водные ресурсы, №1, 1972. С. 52–94; Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеоздат. 1976. 254 с.; Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения. М.: Наука, 2003, 352 с.; Раткович Д.Я. Динамика речных русел / Д.Я. Раткович; Москва: ГЕОС, 2007. 155 с.

Даниил Яковлевич уделял большое внимание воспитанию научных кадров, осуществлял руководство аспирантами и докторантами; среди его учеников – 3 доктора и 11 кандидатов наук, продолжающих и развивающих идеи стохастической гидрологии. Он читал курсы лекций по гидрологическим и водохозяйственным расчётам в МГУ им М.В. Ломоносова, Московском инженерно-строительном институте, на Международных высших курсах ЮНЕСКО при МГУ.

Высокая профессиональная научная квалификация послужила основанием для приглашения Даниила Яковлевича на работу в Государственную экспертную комиссию Госплана СССР. Под его руководством были подготовлены экспертные заключения по ряду важнейших для страны проектов: Генеральной схеме комплексного использования и охраны водных ресурсов СССР в целом и ряда речных бассейнов, Москвы и других крупных городов; ТЭО промышленных узлов: Нижне-Днестровского, Южно-Украинского энергетического и др. Д.Я. Раткович консультировал разработку схем использования водных ресурсов рек Хуанхэ, Янцзы, Руфиджи, Лимпопо.

Характерная особенность научной деятельности Даниила Яковлевича – нетерпимость к скороспелым выводам, научный консерватизм в хорошем смысле этого слова. Огромная значимость его научного наследия заключается в способности передать будущим поколениям гидрологов основные принципы научного исследования: максимальное использование всех имеющихся материалов, выбор практически важной научной проблемы; необходимость широкого научного кругозора, реальная оценка значимости собственных результатов, перспективности выполняемых работ и задач дальнейших исследований.

Д.Я. Раткович был членом Учёного и Диссертационного советов ИВП РАН, ряда научных советов других организаций, постоянным членом редколлегии журнала «Водные ресурсы» со дня выхода первого номера.

Научная и практическая деятельность Д.Я. Ратковича отмечена благодарностями Президиума Академии наук СССР, председателя Госплана СССР, грамотами Президиума РАН и Профсоюза работников РАН. В 1996 г. ему было присвоено Почётное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Даниил Яковлевич – крупнейший учёный, талантливый руководитель, мудрый и принципиальный человек; он отличался эрудицией, бескомпромиссностью, высоким чувством гражданской ответственности, прекрасным чувством юмора и другими замечательными качествами.

М.В. Болгов (ИВП РАН)

Актуальные проблемы стохастической гидрологии¹

Д.Я. Раткович

Стохастическая гидрология возникла и развивалась как прикладная дисциплина, призванная удовлетворять запросы практики. Темпы развития по отдельным направлениям исследований существенно различаются. Это обусловлено, в частности:

- разновременностью выдвижения практикой тех или иных задач, недостаточной длительностью сбора материалов в период становления данной науки (да и сейчас длительность наблюдений за теми или иными процессами ограничена);
- отсутствием или недостаточностью соответствующих математических методов для решения возникающих задач.

Многие гидрологические процессы неразрывно связаны с метеорологическими, что в целом заставляет говорить о задачах гидрометеорологии.

Основополагающие работы в области применения вероятностных методов в инженерно-гидрологических расчетах принадлежат С.Н. Крицкому и М.Ф. Менкелю. Полученные ими результаты, как правило, в течение примерно 40 лет были доведены до состояния, позволяющего использовать их на практике. Исследованные С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем основные проблемы, возникающие при проектировании и эксплуатации водохозяйственных сооружений, а также при анализе задач водного хозяйства, – расчеты многолетних колебаний речного стока и уровней внутренних водоемов, определение параметров и правил эксплуатации водно-ресурсных и водно-энергетических систем.

Большое практическое значение при решении научных и практических задач получил метод статистических испытаний (Монте-Карло), внедрение которого в гидрологические расчеты во многом обязано работам С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. Основные результаты исследований обобщены в монографиях [9, 10], хотя многочисленные публикации в указанных областях появлялись и раньше, либо одновременно с ними. Стохастическая гидрология продолжает развиваться. Однако и до настоящего времени невозможно

¹ Раткович Д.Я. Актуальные проблемы стохастической гидрологии. // Водные ресурсы. 2000. №6. С. 645–654

представить себе прикладную гидрологию без работ С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля.

Основные итоги развития вероятностных методов в гидрометеорологии рассмотрены в [17]. В данной статье особое внимание уделяется задачам развития стохастической гидрологии на фоне уже полученных результатов.

Гидрологический режим водотоков

Интерес к режиму уровней воды в реках и на водоемах, непосредственно влияющих на удовлетворение практических запросов человека, возник в далеком прошлом. Однако любопытно, что наиболее изучены колебания не уровней, а расходов воды, причем неоднозначность в общем случае связи между этими величинами затрудняет переход от распределений вероятностей расходов к распределению вероятностей уровней. Мало изучены распределения вероятностей длительности стояния того или иного высокого уровня воды в реке, что имеет важное значение для оценки увлажнения земель при разливах воды. Из гидрометеорологических характеристик к наиболее изученной относится годовой сток рек. Безусловные распределения годовых значений и характер корреляционных связей между ними изучены относительно хорошо.

На базе анализа данных массовых наблюдений за стоком рек земного шара предложена стохастическая модель колебаний годового стока рек и рекомендации по назначению ее числовых параметров [13]. Первоначально последовательные значения годового стока рассматривались как независимые, затем как зависимые последовательности, образующие простую цепь Маркова при линейной корреляции с коэффициентом $r=0.3$. Естественно, что на первом этапе предположения о стохастической модели стока задавались априорно (простая цепь Маркова с использованием математического аппарата линейной корреляции [8]). В последующем на основе анализа временных рядов стока 400 рек земного шара [13, 14] была подтверждена гипотеза о применимости простой цепи Маркова, но при нелинейной автокорреляции между смежными значениями стока (линейной между их обеспеченностями, имеющими по определению равномерное распределение в интервале от 0 до 1)².

² Разработка математического аппарата указанной модели принадлежит И.О. Сарманову (ИВП РАН) [20].

Коэффициент корреляции, равный $0,1-0,5$, оказался связанным с модулем стока (удельной водоносностью бассейна). В среднем это отвечало гипотезе Крицкого–Менкеля ($r=0,3$). Следует отметить, что при одном и том же значении r различные гипотезы о типе корреляции приводят к заметной разнице в результатах расчета многолетнего регулирования стока.

Часть исследователей считает, что упомянутое предположение о типе корреляции требует дополнительных обоснований. Однако такого рода работы пока неизвестны. Следует отметить одну из особенностей обсуждаемой модели: с ростом предшествующего члена математическое ожидание последующего не растет беспредельно (как при линейной корреляции между случайными величинами), а стремится к некоторой асимптоте.

Желательность дальнейших исследований проблемы вызвана также тем обстоятельством, что автором данной статьи были использованы материалы наблюдений за стоком до 1965 г. Продление исходных временных рядов на 30–35 лет позволит существенно повысить доверие к получаемым результатам.

Стохастика максимального стока изучена слабее. Прежде всего это относится к типу безусловного распределения вероятностей, который в принципе может различаться на реках разного типа питания, хотя, по-видимому, трехпараметрическое распределение Крицкого–Менкеля, отличающееся значительной гибкостью, дает хорошее приближение к натуре при удачном назначении коэффициента асимметрии (за исключением рек смешанного питания, когда в различные годы формирование максимальных расходов воды может быть обусловлено различными процессами). В принципе решение здесь «нащупано» уже давно: в частности, это применение усеченных распределений, рекомендуемое Л.Ф. Сотниковой и др. (ИВП РАН). Реализация данной идеи требует удачного выбора типов распределений, принимаемых для композиции. Положительно следует оценить предложение М.В. Болгова и В.М. Писаренко [3] использовать для зоны высоких значений распределение Парето, отличающееся «тяжелым хвостом» и дающее меньшие ошибки для зоны высоких максимумов. Открытым остается вопрос о назначении точки усечения, за которую в настоящее время принимается медиана.

Когда речь идет об определении среднегодовых значений характеристик гидрометеорологических процессов, в большинстве случаев в безусловно может применяться трехпараметрическая модификация гамма-распределения, предложенная С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем. Колебания уровня внутренних водоемов (применительно к гипотезе о независимости слоя испарения с водной поверхности от уровня) с достаточно хорошим приближением можно определить с помощью нормального распределения [22]. При отказе от этой гипотезы возможно сильное отклонение от этого распределения, включая переход к многомодальным распределениям [23]. Подробнее эта гипотеза и вытекающие из нее следствия рассмотрены ниже.

Разнообразие моделей сезонного хода свидетельствует в первую очередь об отсутствии удовлетворяющих практику решений. Относительно лучше исследован сезонный ход стока рек снегового питания, характеризующихся спокойным однопиковым половодьем при относительно небольшой интенсивности подъема и спада уровней [16]. Любопытное свойство временных рядов стока с месячным, декадным и пентадным интервалами дискретности заключается практически в отсутствие связей между стоком половодных месяцев, в то время как для периода межени такая связь может прослеживаться до нескольких лет.

Дискуссионным остается вопрос о так называемых дальних внутрирядных связях. Их малость – на границе статистической значимости – более уверенно установлена для годовых осадков (независимо от физико-географической зоны) и максимальных расходов воды. По-видимому, это же свойство характерно для экстремальных годовых отметок стонно-нагонных колебаний уровня внутренних водоемов. В речном стоке автокорреляция в общем растет с уменьшением удельной водоносности территорий – модуля стока [14]. Повышенное значение автокоррелированности свойственно испарению, а также скаляру среднегодовой скорости ветра.

Дальние внутрирядные связи рассмотрены во многих работах. В качестве возможных причин этих связей называются различные геофизические и гелиофизические факторы, в частности колебания солнечной активности, характеризуемой числами Вольфа. Работы, которые подтверждают наличие этих связей, основаны, как правило,

на фетишизации автокорреляционных (спектральных) функций одного или нескольких временных рядов годового стока. Однако при объективной проверке выясняется, что положительные выводы о наличии этих связей основываются на статистически незначимых зависимостях.

Следует отметить, что ряды значений стока за одноименные меженные месяцы многолетних периодов обнаруживают существенные корреляционные зависимости при запаздываниях до 6–8 лет и затухают медленнее, чем свойственно простой цепи Маркова [16]. В ряде случаев эффект достигается при использовании материалов наблюдений по рекам-аналогам или при использовании массового группирования материалов наблюдений по множеству объектов с целью уточнения статистических параметров принимаемых типов распределения вероятностей [9]. Здесь сложности возникают при назначении границ районов, в пределах которых группируются данные: при крупных размерах районов снижается степень однородности материалов из-за географической разнородности условий формирования стока; при уменьшении размеров районов степень однородности данных растет, однако сокращается объем эффективной информации из-за увеличения взаимной автокоррелированности. Вопрос об оптимальном размере районов обобщения данных требует индивидуального обоснования в каждом отдельном случае.

Эффективность статистики построений определяется в первую очередь степенью надежности временных рядов изучаемой гидрометеорологической величины, т.е. длительностью и точностью исходных натуральных наблюдений. Проблема эта включает в себя множество частных задач, которые распадаются на три группы (адекватность измерительной аппаратуры поставленным задачам; методика наблюдений; методика обработки материалов наблюдений, а в ряде случаев и трактовка полученных результатов). Общие требования к каждой из решаемой задач – устранение систематических ошибок при минимизации случайных.

До настоящего времени отсутствуют глубокие исследования требований к методике гидрометрических работ, обеспечивающей желательную точность результатов. Во многих случаях нарушается одно из основных требований теории приближенных вычислений: их точность при обработке материалов гидрометрических измере-

ний существенно превышает точность самих измерений. В ряде случаев отсутствуют даже представления о достигаемой точности результатов и степени их надежности. Поэтому проблемы нуждаются в специальном глубоком изучении.

Гидрологический режим внутренних водоемов

С 1930-х гг. началось интенсивное понижение уровня Каспийского моря. Этот факт привлек к себе внимание практиков в первую очередь в связи с начавшимся водохозяйственным строительством в бассейне Волги, масштабы которого на обозримую перспективу представлялись (и фактически оказались) грандиозными: намечалось широкое развитие орошения в бассейне моря. Все это могло только «подстегнуть» наметившую тенденцию к понижению уровня моря, а поэтому возник интерес к теории формирования его уровня в естественных условиях и возможного его влияния на процесс сокращения притока, обусловленного хозяйственной деятельностью в бассейне и потерями воды на дополнительное испарение с поверхности создаваемых и намечаемых в перспективе водохранилищ.

Следует обратить внимание читателя на беспочвенность поисков зависимостей между годовым стоком и испарением, с одной стороны, и поведением уровня – с другой. Уровень формируется под влиянием составляющих водного баланса за длительный период времени: даже при нулевом годовом притоке уровень не может понизиться за 1 год более чем на высоту слоя годового испарения. Однако из этого совсем не следует независимость уровня от составляющих водного баланса: сильные коррелятивные связи, отвечающие теоретическим зависимостям, обнаруживаются между составляющими баланса и годовыми приращениями уровня [15].

Следует отметить малую достоверность данных, характеризующих водопотребление, особенно планируемое на перспективу. Это надо принимать во внимание при оценке результатов расчета (вероятностного прогноза) уровня водоема.

Примерно 15 лет назад разгорелась острая дискуссия по вопросу переброски части стока некоторых северных рек в бассейн Каспия через Волгу. Важный элемент этой дискуссии – вероятностный прогноз уровня Каспийского моря. Теперь, когда страсти улеглись,

можно подвести некоторые итоги этой дискуссии, в значительной мере поучительной для лиц, занимающихся такого рода прогнозами. Здесь нужно отметить две группы факторов.

С одной стороны, решениями тогдашних директивных органов было предусмотрено широкое развитие орошения в бассейне Каспийского моря с увеличением общих затрат воды в бассейне с 30 до 100 км³/год, т.е. на 70 км³/год (~30% среднеемноголетнего волжского стока). К этому следует добавить, что вследствие естественных причин уровень Каспия к 1979 г. уже снизился до отметки –29 м абс. (по мнению ихтиологов, низкой, предельно допустимой для рыбного стада).

С другой стороны, нельзя было ориентировать прогнозы уровня моря только на неблагоприятный и средний сценарии природных условий. Обязательно нужно было рассмотреть сценарий поведения уровня при благоприятных для него гидрометеорологических условиях на перспективу, т.е. при повышенном естественном стоке и пониженном испарении с поверхности моря (что фактически и реализовалось: за 1978–1990 гг. повышенный приток к морю характеризовался вероятностью 4%, а низкое видимое испарение с его поверхности (испарение минус осадки) – вероятностью ~0.5% [15]).

Таким образом, стратегия хозяйствования в зонах, подверженных возможным затоплениям и осушению при колебаниях уровней внутренних водоемов, должна предусматривать всю амплитуду реальных колебаний уровней.

Естественным надо признать направление исследований, опирающееся на водный баланс моря за расчетный интервал времени: приток к морю равен испарению минус осадки на поверхность моря плюс приращение запасов воды за счет повышения уровня (с учетом водообмена с подстилающими породами). В первом приближении все эти составляющие баланса рассматривались как некоррелированные последовательности, хотя учет этих автокорреляций в дальнейшем не создал каких-либо трудностей. Итогом этих исследований стало предвидение поведения уровня моря на перспективу в средних гидрометеорологических условиях (разумеется, с учетом их естественной изменчивости) и вероятность тех или иных отклонений от этого среднего поведения при наступлении многоводных или маловодных периодов притока, а также серий сухих или влажных лет по испарению.

Исследования закономерностей колебаний уровней внутренних водоемов развивались двумя методами: аналитическим и методом статистических испытаний (Монте-Карло). Второй из указанных методов носит вспомогательный характер, хотя целый ряд результатов (в частности, распределение выбросов) получен именно с его помощью. Сущность его в первом приближении заключается в том, что последовательность взаимно независимых или зависимых величин принимается за последовательные значения обеспеченности какой-либо составляющей водного баланса; таким же образом формируются последовательные значения других составляющих; затем методом водного баланса вычисляются последовательные значения уровня. Любопытно, что первый опыт такого исследования, вероятно, был осуществлен С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем еще в довоенные годы, причем за последовательные случайные числа принимались пронумерованные клочки бумаги, сложенные в шляпу при возвращении обратно «вышедших в тираж номеров». Дальнейшее углубленное развитие метод Монте-Карло в анализе уровня режима водоемов получил, в частности, в [1, 7, 21].

Аналитические разработки впервые были выполнены С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем применительно к модели с дискретным временем. В дальнейшем они были продолжены В.Е. Привальским, а также Д.Я. Ратковичем и А.В. Фроловым [22] и другими исследователями, в частности, применительно к модели с непрерывным временем. Оба метода обычно дают практически совпадающие результаты. В связи с этим особо следует отметить работы А.В. Фролова, распространение полученных им результатов на проточные водоемы. С помощью этих данных была создана стохастическая модель колебания стока озерных рек.

Все эти авторы исходили из двух предположений: о независимости среднемноголетнего слоя испарения с поверхности моря от положения его уровня и о незначительном влиянии на искомые результаты неотектонических процессов и колебаний и водообмена моря с подстилающими породами. Но если второе предположение удалось в конечном счете подтвердить специальными исследованиями, то первое, по мнению части исследователей, остается недоказанным до настоящего времени.

Действительно, анализ связей слоя испарения с уровнем моря не показывает значимой корреляции между ними, на чем и базировалось длительное время представление об отсутствии обсуждаемой связи (или отсутствии значимости). Однако испарение с морской поверхности как замыкающий член водного баланса поддается лишь косвенной оценке, а значит включает в себя все погрешности в оценках его составляющих, что может затушевывать не очень тесную связь. Правда, для морфометрии Каспийского моря характерно приблизительное сохранение площади мелководий при изменении уровня в интересующем практику диапазоне, что способствует сохранению слоя испарения с изменением уровня. Тем не менее теснота связи между указанными процессами остается неопределенной и может в принципе повлиять на поведение уровня.

Анализ режима уровня внутреннего водоема при значимости указанной связи [23] показал, что при определенной тесноте связи влияние ее на поведение уровня может быть очень большим, вплоть до изменения типа распределения вероятностей (переход от одно-модального нормального распределения уровня в бессточных водоемах в общем случае к многомодальному).

В заключение следует отметить, что если первый из указанных подходов развивался много лет, применительно к нему выявлены вероятностные закономерности колебаний уровня, характеристики выбросов, вероятности тех или иных понижений уровня и, наконец, методы вероятностного предвидения, т.е. имеется относительно полно разработанная методика практического применения, то второй подход пока находится в стадии разработки. Поэтому на данном этапе наряду с практическим использованием первого из названных подходов надо развернуть исследования для получения прямых оценок испарения с помощью специальных натуральных и лабораторных исследований и обоснованного выбора границ применимости указанных выше подходов.

Нельзя обойти молчанием влияние изменений климата на уровеньный режим водоема. В историческом прошлом (тысячелетия назад) климат существенно отличался от современного, как и, по всей видимости, составляющие водного баланса моря. Однако использование исторических реставраций климата вряд ли представляет практический интерес для прогнозов уровня. Климат прак-

тически не предсказуем, и закономерности его изменения в прошлом вряд ли могут использоваться для экстраполяции уровня, равно как и данные об экстремальных уровнях. Крайне важно, что анализ временных рядов составляющих водного баланса не выявляет статистически значимых трендов (за исключением, может быть, некоторых предварительных данных о трендах испарения на ограниченных участках европейской территории страны, полученных Е.С. Чижовой [16]). Это дает основание в прогнозах уровня режима исходить из представлений о псевдостационарности климата на отрезках времени порядка столетия, которыми обычно ограничивается сумма продолжительности наблюдений и заблаговременности прогнозов.

Внутригодовые колебания уровней внутренних водоемов, вызываемые сезонными изменениями составляющих водного баланса, на бессточных водоемах обычно невелики по сравнению с межгодовыми, однако на проточных водоемах могут даже превышать их. В первом приближении задача эта для Ладожеского озера рассматривалась А.В. Фроловым [22], а для Каспийского моря – Д.Я. Ратковичем [14], но анализ ее требует дополнительных разработок, в первую очередь для водоемов разных типов режима притока.

Чаще всего серьезные проблемы с краткосрочными колебаниями уровня вызывают сгонно-нагонные явления. На внутренних водоемах эти колебания доходят до нескольких метров даже при сравнительно ограниченных размерах акватории (как, например, на Азовском море). Может считаться установленным, что безусловное распределение вероятностей этих уровней может сильно отличаться от нормального [15], а автокорреляция между максимумами смежных лет статистически незначима. В целом статистическая изученность этой проблемы крайне ограничена. Физические же модели процесса распространения нагонных волн содержат множество допущений и условностей. Совсем мало изучен вопрос о композиции волн продвижения нагонов и половодных в условиях переменного подпора из-за изменения балансовых уровней моря.

Управление режимом поверхностных вод

Все крупные, большая часть средних и многие малые реки используются человеком. При этом возникает два комплекса задач.

Один из них связан с изменением естественного режима стока и уровня воды в целях покрытия потребностей в ней, другой – с минимизацией экологических ущербов, обусловленных водопользованием.

На внутренних водоемах предметом управления может быть оптимизация уровня режима, солености, а в отдельных случаях – перераспределение речного притока по береговой линии или по акватории для распреснения отдельных ее частей (например, увеличение притока речных вод в Северный Каспий для улучшения условий нагула осетровых рыб).

Проблема управления речным стоком в отличие от таковой для других водоемов была предметом углубленных исследований в течение ряда десятилетий. По-видимому, наибольший вклад в ее развитие внесен С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем (результаты их исследований обобщены в монографиях [9, 10]). К основным достижениям в области управления можно отнести:

- создание методики составления и интерпретации результатов водохозяйственного баланса, определяющих состав необходимых инженерных мероприятий;
- развитие и внедрение в практику методов расчета регулирования стока водохранилищами (низкого стока для увеличения гарантированной водо- и энергоотдачи, высокого для срезки пика паводий и паводков, вызывающих наводнения), а также оптимальных правил эксплуатации этих систем;
- обоснование параметров водно-ресурсных и водно-энергетических систем, а также оптимальных правил эксплуатации этих систем.

Основой управления водно-ресурсными системами служат водохозяйственные балансы – сопоставление располагаемых водных ресурсов с потребностями в воде. Принципы решения этой проблемы опубликованы достаточно давно [18]. Однако ряд положений требует уточнения. Так, годовое водопотребление на конкретную дату обычно оценивается однозначно, однако оно подвержено значительным колебаниям (применительно к ирригации в аридной зоне межгодовая изменчивость испарения характеризуется коэффициентом вариации $C_v=0,05$, а в зоне неустойчивого увлажнения различия в испарении сухого и влажного годов достигают 2–3 раз).

Крайне неустойчиво внутригодовое распределение испарения, опять же особенно в зоне неустойчивого увлажнения (максимальная ордината может изменять свое календарное положение до двух месяцев). В меньшей мере это касается других видов водопотребления (коммунальное, гидроэнергетика, водный транспорт и др.).

Изложенное требует дифференцированной разработки стохастических моделей водопотребления (по его видам для различных физико-географических зон и т.п.).

Для большинства крупных речных систем обычно основная доля расходной части водохозяйственного баланса – специальные попуски: экологические, санитарные, режимные (для выноса наносов и избытка солей), попуски, питающие водоем (приемник речного стока), обводняющие пойму и дельту, и наконец, энергетические и водно-транспортные. Однако относительно надежной оценке поддаются только два последних вида попусков из приведенного перечня. В то же время все они подвержены межгодовым и внутригодовым колебаниям, что, как и в водопотреблении, требует разработки соответствующих стохастических моделей.

В связи со случайным характером колебаний стока 100%-ная гарантия покрытия потребностей в воде невозможна. В практике водохозяйственных организаций страны установилась традиция нормативного назначения гарантии, как правило, по доле бесперебойных лет – обеспеченность водоотдачи. Естественно, она дифференцируется в зависимости от ответственности потребителя (от 97 до 50%). Правильное в принципе положение об экономическом обосновании обеспеченности в каждом отдельном случае не освоено практикой и требует дополнительных методических разработок.

Еще более сложное положение складывается с определением допустимых ограничений водоподдачи в маловодные годы, выходящие за пределы расчетной обеспеченности. Некоторые потребители, например рыбное стадо, очень чувствительны к повторению подряд нескольких перебойных лет. Это налагает специфические требования к правилам эксплуатации водно-ресурсных систем.

Колебания речного стока обычно не совпадают с изменяющейся в годовом разрезе потребностью в воде, и в отдельные периоды располагаемые водные ресурсы оказываются недостаточными. Если сокращение водопотребления оказывается нецелесообразным, воз-

никает необходимость в создании водохранилищ, которые запасают воду в периоды ее избытка и осуществляют дотации к естественному стоку в периоды дефицита. Когда годовая потребность в воде не превышает сток маловодного года расчетной обеспеченности и необходимо лишь внутривидовое перераспределение стока, можно ограничиться созданием водохранилища сезонного регулирования. Задача таких водохранилищ – преобразовать внутригодовые колебания стока в соответствии с требованиями потребителей. В противном случае необходимо перераспределение стока между годами, чтобы сократить межгодовые его колебания (возникает необходимость в многолетнем регулировании стока). Назначение водохранилищ многолетнего регулирования – выравнивание годового стока в многолетнем разрезе. Напомнить эти положения полезно, чтобы подчеркнуть различие в задачах водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования стока.

В расчетах регулирования при заданной обеспеченности водоотдачи из двух характеристик (сток и гарантированная отдача), когда известна одна из них, требуется определить другую.

Расчет сезонного регулирования стока выполняется водно-балансовым методом для нескольких маловодных лет (обеспеченностью стока, близкой к заданному значению), запасая воду в периоды ее избытка и дотируя сток в периоды дефицитов. Методически эти операции затруднений не вызывают.

Иначе обстоит дело при расчетах многолетнего регулирования стока, которые выполняются применительно ко всему периоду наблюдений. Основная проблема заключается в том, что имеющиеся ряды наблюдений обычно недостаточно продолжительны для характеристики чередования лет различной водности, вероятности серий того или иного числа маловодных лет подряд. Это дало толчок к созданию С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем [8] так называемых обобщенных методов расчета режима водохранилищ многолетнего регулирования, опирающихся на вероятностные методы и математическую модель колебания годового стока.

Обсуждая обобщенную методiku расчетов многолетнего регулирования стока, необходимо отметить, что все вышесказанное относилось к определению многолетней составляющей емкости. Кроме нее нужно определять сезонную составляющую, предназначенную

для приведения в соответствие гидрографов внутригодовой отдачи и водопотребления. В свое время С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем был рекомендован метод ее определения для постоянной отдачи, что отвечало типовой задаче того времени – созданию водохранилищ для гидроэлектростанций и водного транспорта. Сейчас такой подход, как правило, не отвечает реальному составу потребителей и требует радикальных уточнений.

В заключение обсуждаемой проблемы регулирования стока следует обратить внимание на соотношение результатов, получаемых обобщенным методом и по календарным рядам стока и водопотребления, и на рекомендации использовать тот или другой метод, а также на расчеты регулирования стока в нестационарных случаях (рост водопотребления в рассматриваемой перспективе или учет меняющихся климатических условий).

При разработке методов расчета многолетнего регулирования стока следует иметь в виду, что календарный метод характеризуется ошибками, обусловленными нерепрезентативностью имеющегося временного ряда наблюдаемых значений стока. Эти погрешности оказываются тем большими, чем короче ряд наблюдений. В обобщенных методах расчета ошибки обуславливаются рядом причин: неточностью стохастической модели стока и ее числового параметра (коэффициента корреляции), ошибками в значениях статистических параметров стока, которые (как и при календарной методике расчета) растут с сокращением длительности исходного ряда наблюдений.

К сожалению, малозамеченными остались работы Л.В. Ивановой [4, 5], в которых проанализированы систематические и случайные ошибки методов расчета многолетнего регулирования стока. Как и следовало ожидать, обобщенный метод дает результаты, свободные от систематических ошибок, календарный же требует введения поправок на устранение смещенности. Однако случайные ошибки обобщенного метода при некоторых соотношениях параметров оказываются соизмеримыми с ошибками календарного метода. Сопоставление проводилось только по многолетней составляющей емкости (по годовым величинам стока и водопотребления). Если в связи с этим учесть погрешности обобщенного метода, обусловленные отсутствием пока корректной методики определения сезонной

составляющей емкости, то ошибки результатов этих расчетов будут большими. Таким образом, пока нельзя сделать окончательных выводов о границах применимости обсуждаемых методов расчета: требуются дополнительные исследования. Может быть, стоит подумать о реализации идей о переходе на определение непосредственно общей емкости водохранилищ многолетнего регулирования стока, без разделения ее на многолетнюю и сезонную составляющие. Разработка соответствующих методических подходов, по-видимому, будет непростой.

Важнейшее практическое значение имеет составление оптимальных правил эксплуатации водно-ресурсных и водно-энергетических систем и соответствующих диспетчерских графиков. Не имея возможности углубляться в эту специальную проблему, отошлем читателя к [2]. Следует лишь заметить, что многие из указанных правил на практике используются достаточно давно, а поэтому не в полной мере учитывают требования к водному режиму со стороны экосистем и нуждаются в уточнении. Главная проблема в этом случае – методология обоснования указанных требований (по объему, режиму и обеспеченности).

Сложившаяся практика гидрологических и водохозяйственных расчетов опирается на гипотезу о стационарности стока и других составляющих водного баланса, а также водопотребления. На практике, в случаях, когда нужно учитывать динамику водопотребления, расчет выполняется для нескольких принятых расчетных уровней времени, для каждого из которых используются методические подходы, отвечающие стационарному случаю; то же относится к гипотезе о стационарности стока и других составляющих водного баланса, а также водопотребления. Условность такого подхода очевидна.

Сказанное относится только к обобщенному методу. При выполнении расчетов по календарным рядам составляющих водохозяйственного баланса учет изменяющихся от года к году объемов стока и водопотребления дополнительных затруднений не вызывает.

При разработке сценариев изменения составляющих водохозяйственного баланса необходимо отметить следующее [15]:

- анализ выполненных ранее различными организациями прогнозов водопотребления и потерь стока указывает на преувеличение этих оценок. По-видимому, здесь дело не в случайных погрешно-

стях. Возможен недоучет объемов возвратных вод, а в более широком смысле – погрешности оценки водообмена речных систем с подземными горизонтами;

- разработка сценариев нестационарности составляющих водного баланса должна включать в себя оценки изменения всех статистических параметров, а не только нормы. Так, ростом нормы стока обуславливается увеличение располагаемых водных ресурсов, а ростом изменчивости – уменьшение их в маловодные годы. Нарушение изменчивости стока может сильнее повлиять на результаты водохозяйственных расчетов, чем такое же относительное нарушение нормы стока. Подход к решению такого рода задач заключается в ориентации на физические или динамико-стохастические модели формирования стока и других составляющих водного баланса.

В последнее время возрастает интерес к совместному использованию поверхностных и подземных вод. Речь идет в первую очередь о привлечении поверхностных вод лишь в периоды дефицитов водохозяйственного баланса. Различные аспекты проблемы рассмотрены, в частности, в [6]. Несмотря на множество работ на обсуждаемую тему, теория такого регулирования стока (использование подземных вод) пока не создана, хотя социальный заказ на нее достаточно велик (например, для решения проблемы водообеспечения Московского региона).

В случаях привлечения подземных вод для периодического использования в системе технического водоснабжения АЭС к числу варьируемых параметров можно отнести объем водохранилищ, его среднюю водоотдачу, а также количество, водоотдачу и размещение подземных водозаборов. На практике иногда требуется решить обратную задачу: при заданных параметрах водохозяйственной системы определить обеспеченность гарантированной отдачи.

Изучение условий совместного использования поверхностных и подземных вод требует решения ряда научных и проектно-эксплуатационных задач, к числу которых можно отнести:

- изучение закономерностей чередования маловодных и многоводных периодов на реке в многолетнем и внутригодовом разрезе, а также колебаний располагаемых водных ресурсов подземного горизонта;

- типизацию природных условий, благоприятствующих совместному использованию поверхностных и подземных вод, и определение возможных способов совместного использования вод;
- обеспечение гарантии восполнения форсированно срабатываемых в маловодный период запасов подземных вод до наступления очередного маловодного периода и допустимости предельной сработки запасов воды в подземных горизонтах;
- рассмотрение вариантов искусственного восполнения запасов подземных вод на участках форсированной их сработки.

Сформулированные ограничения и рекомендации были учтены при проектировании системы водоснабжения второй очереди Калининской АЭС, основанном на результатах многовариантных имитационных экспериментов с ее моделью [15]. Как показали расчеты совместного использования поверхностных и подземных вод в системе водоснабжения Калининской АЭС, резкое снижение дефицитов водоподачи достигается при относительно незначительном среднесрочном использовании вод из подземных горизонтов.

Существенное влияние на экологические и хозяйственные условия оказывает оптимизация режима колебаний уровня внутренних водоемов (управление им). Применительно к Каспийскому морю такая задача рассматривалась в рамках проблемы переброски в бассейн моря вод из северных рек [11]. Оказалось, что при релейном управлении годовым объемом перебрасываемых вод можно существенно уменьшить амплитуду колебаний уровня моря. А.В. Фролов выдвинул идею использовать в качестве амортизатора колебаний уровня Каспийского моря зал. Кара-Богаз-Гол, поступление вод в который, естественно, должно регулироваться. Вероятно, обе эти идеи требуют дополнительного анализа.

Прочие вопросы

Турбулентность, обуславливающая перенос тяжелых частиц потоком, поддается лишь вероятностному описанию, как и распределение переносимых частиц по живому сечению, воздействие их на русловые процессы и на берега. Вероятно, одни из первых результатов в этой области были получены К.И. Россинским и И.А. Кузьминым (ближайшими сподвижниками С.Н. Крицкого, М.Ф. Менкеля) и их учениками [19]. Однако приходится признать, что некоторые

практические результаты (предвычисление твердого стока во взвешенном и влекомом состоянии, временной прогноз русловых деформаций, оценка динамики русловых процессов в бьефах гидротехнических сооружений и т.д.) требуют уточнений. К сожалению, сейчас натурные наблюдения за режимом наносов и русловыми процессами практически не проводятся; поэтому не ведется проверка методических рекомендаций по расчетам (прогнозам) динамики твердого стока в бьефах гидроузлов, заиления водохранилищ, местных и общих размывов за подпорными сооружениями и т.п. (выполненных в процессе проектирования водохозяйственных объектов).

Решение задач, связанных с режимом наносов и русловыми процессами, вероятно, нужно начинать с определения условий взвешивания (перекатывания) и перемещения наносов, с анализа воздействия турбулентного потока на подстилающую аллювиальную поверхность. Таким образом, комплекс причин обсуждаемых процессов имеет вероятностный характер, что определяет методы их изучения и прогнозирования. В то же время основу понимания этих процессов дает именно эксперимент – лабораторный и полевой. Применительно к речным потокам основополагающая идея была высказана К.И. Россинским и И.А. Кузьминым. Она заключалась в разделении всех наносов на руслоформирующие фракции, возможное содержание которых в потоке определяется лишь его транспортирующей способностью, и неруслоформирующие, которыми поток всегда недогружен и концентрация которых определяется исключительно условиями питания наносами (наличием в русле и поступлением извне). Связи транспортирующей способности потока с концентрацией перемещаемых частиц отмечены только для руслоформирующих фракций. Этому вопросу далеко не всегда уделяется должное внимание (начиная с методики гранулометрического анализа наносов, в которой предусматриваются специальные меры по искусственному разрушению природных агрегатов, формирующих частицы наносов диаметром 0.1 мм).

Вторая важнейшая особенность анализа режима наносов и русловых процессов – учет неоднородности пород ложа и берегов, во многом определяющей характер русловых процессов. Таким образом, основа анализа этих задач – вероятностное описание неодно-

родности донных отложений и берегов, включая глубину возможных размывов.

Именно недоучет этих факторов мог быть причиной того, что результаты, полученные с помощью известных теоретических моделей (например, гравитационной модели М.А. Великанова), расходились с экспериментальными до нескольких порядков.

При прогнозировании русловых деформаций на относительно протяженных участках русел за десятки лет, вероятно, на обозримую перспективу останется на вооружении сопоставление последовательных русловых съемок и лоцманских карт. В оценке возможных размывов русла в местах сужения потока, особенно в условиях пространственной задачи вытекания струи в широкий бьеф, сложенный размываемыми породами, динамико-стохастические модели уже играют существенную роль, которая должна возрасти.

При определении ледотермического режима рек основные трудности возникают в бьефах гидротехнических сооружений (запаздывание сроков вскрытия ледяного покрова и опережение сроков его формирования, т.е. сокращение продолжительности навигации по сравнению с естественным режимом; формирование незамерзающей полыньи в нижнем бьефе, в пределах которой постоянно формируется шуга), а также на быстротоках каналов, особенно в зонах умеренного климата, с периодически исчезающим ледяным покровом (реки Средней Азии).

Несмотря на то, что задачи эти имеют важное практическое значение, методы решения их опираются, как правило, на полуэмпирические подходы. Если же результаты и задаются в виде вилки значений, относящихся к суровым и мягким зимам, обеспеченность этих значений остается неизвестной. Крайне желательна разработка динамико-стохастических моделей формирования и таяния ледового материала при различных условиях протекания воды в разных погодных условиях.

Стохастического анализа требуют и процессы формирования качества природных вод под влиянием сбросов в гидрографическую сеть загрязняющих веществ, а также поступления их с талыми и дождевыми водами и с атмосферными осадками. Особенность указанных процессов – влияние на них биохимических процессов при перемещении примесей и выпадение на дно некоторых продуктов

этих процессов. Для получения «доступа» к указанным задачам необходимы массовые материалы натуральных наблюдений, а также вероятностное обоснование методики соответствующих замеров и обработки их результатов.

В первую очередь надо обеспечить репрезентативность отбираемых проб взвешенных наносов, обуславливая при этом такую продолжительность отбора пробы, при которой «гасятся» пульсации концентрации наносов. В то же время гранулометрический состав пробы должен быть адекватен природному. То же относится к отбору проб донных отложений батометрами, причем в данном случае также должна быть сохранена структура отбираемых проб. Указанная работа по совершенствованию отбора проб требует тщательных исследований. Разумеется, в ней должны учитываться рекомендации по объему проб, частоте их отбора, размещению по живому сечению потока. Рекомендации эти могут быть различными в разные сезоны и на реках с различным составом перемещаемых наносов и донных отложений.

Выше отмечалась важность сохранения агрегатной структуры частиц, размеры которых превышают 0,1 мм. С этой целью должны быть исключены кипячение и растирание наносов в процессе гранулометрического анализа, а также обработка их веществами, разрушающими агрегатное состояние. Влияние этих процедур на результаты анализа очень велико [12]. Важно сохранить при анализе соотношение между геометрической и гидравлической крупностями частиц, которое характерно для речного потока.

Желательно обратить внимание на исследование вихревой структуры перемещаемых мелких частиц, для чего надо выполнить последовательный отбор проб при различной его длительности. Кроме того, необходим отдельный отбор проб влекомых наносов и донных отложений, размещающихся на гребнях гряд и в их подвальях.

Важная характеристика проточных водоемов, соединенных с мировым океаном или нижележащими солоновато-водными водоемами, – солевой режим. Условия формирования солености неодинаковы на разных объектах и требуют индивидуального рассмотрения. В качестве примеров можно рассмотреть формирование солености Азовского моря и оз. Балхаш.

Баланс пресных вод Азовского моря колеблется по сезонам в связи с внутригодовой изменчивостью речного притока и испарения с поверхности моря: наибольший суммарный сток в море приходится на апрель-май, наименьший – на январь-февраль. Соответственно обменные течения через Керченский прол. отличаются сильной изменчивостью и меняют направление в зависимости от складывающегося пресноводного баланса Азовского моря и синоптической ситуации, что в свою очередь ведет к постоянной перестройке поля солёности вод в море (из Дона и Кубани поступает практически пресная вода, а через Керченский прол. – солёная черноморская). Однако в целом за год поступление пресных вод превышает приток солёных. Обработка материалов наблюдений за притоком и солёностью позволила П.С. Линейкину построить, а затем Д.Я. Ратковичу [15] уточнить динамико-стохастическую модель обменных течений через Керченский прол. и открыла возможность вероятностного прогнозирования среднегодовых значений солёности Азовского моря при различных вариантах роста водопотребления в бассейне.

Следует отметить, что на параметры модели значительное влияние оказывают ветровые воздействия на водную поверхность. В формировании солёности Днепро-Бугского и Днестровского лиманов этот фактор оказывается ведущим.

Озеро Балхаш образует две котловины, соединенные прол. Узунрал. Проточный режим западной части озера обуславливает в ней малую минерализацию вод (~ 1.5‰), что позволяет использовать их в народном хозяйстве. В восточной части солёность превышает 4‰. Поскольку основная часть речного притока (р. Или) поступает в западную часть озера, рост водопотребления в бассейне Или сокращает избыток пресноводного баланса в западной части и влечет за собой рост солёности ее вод. Вопрос о целесообразности регулирования водообмена через зал. Узунарал требует уточнения условий формирования солевого режима озера [15].

Дело в том, что наблюдения за водно-солевым режимом оз. Балхаш выявляют невязки, особенно солевого баланса, которые не могут быть объяснены неточностью наблюдений. Физическая причина их не установлена. Наиболее вероятен отток вод в подземные горизонты. Масштабы этого оттока оцениваются десятками процентов.

Достаточно указать на тот факт, что солезапас вод озера примерно равен их поступлению с речным притоком всего за 70 лет. Возможно влияние на минерализацию вод и других причин.

Таким образом, уточнение причин и совершенствование динамико-стохастической модели колебаний солености оз. Балхаш приобрели практическое значение, в частности, для определения водохозяйственных мероприятий, осуществление которых может иметь важные экологические последствия.

Некоторую аналогию с проблемой западной части оз. Балхаш имеет проблема Малого Арала, целесообразность регулирования водо- и солеобмена которого с основной чашей Аральского моря требует безотлагательного решения.

Заключение

Развитие стохастической гидрологии – основа решения важнейших задач науки и практики. С ее помощью сделано многое для оптимизации решения водных проблем и правил эксплуатации водохозяйственных систем; открыты пути развития водообеспечения страны при максимально возможном учете требований по сохранению окружающей среды. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования в рассматриваемой области. В этом смысле развитие идей С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля имеет перспективы обширного и многолетнего развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асарин А.Е. // Гидротехн. стр.-во. 1972. №8. С. 10.
2. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. // Водноэнергетические расчеты. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 223.
3. Болгов М.В., Писаренко В.Ф. // Вод. ресурсы. 1999. Т. 26. №6. С. 710.
4. Иванова Л.В. // Вод. ресурсы. 1976. №2. С. 9.
5. Иванова Л.В. // Вод. ресурсы. 1976. №5. С. 48.
6. Ковалевский В.С., Раткович Д.Я. // Вод. ресурсы. Т. 25. №6. С. 738.
7. Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука. 1975. С. 157.
8. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. // Тр. Высш. инж. строит. уч-ща. М.; Л.: Госстройиздат, 1932. Сб. №4. С. 7.
9. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1980. 249 с.
10. Крицкий С.И., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. М.: Наука, 1982. 271 с.
11. Маркиш М.С. // Вод. ресурсы. 1982. №2. С. 20.

12. Раткович Д.Я. //Тр. Гидропроекта. 1960. №4. С.41.
13. Раткович Д.Я. // Вод. ресурсы. 1972. №1. С. 52.
14. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 256 с.
15. Раткович Д.Я. Гидрологические основы водообеспечивания. М., 1993. 428 с.
16. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Стохастические модели колебания составляющих водного баланса речного бассейна. М.: РАН, 1997. 262 с.
17. Раткович Д.Я., Фортус М.И. // Вод. ресурсы.1999. Т. 26. №5. С. 568.
18. Руководство по составлению водохозяйственных балансов. Нью-Йорк, 1974. 87 с.
19. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 214 с.
20. Сарманов И.О. //Тр. ГГИ. 1968. Вып. 160. С. 81
21. Сванидзе Г.Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. Тбилиси: М; 1964. 268 с.
22. Фролов А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний проточных озер. М.: Наука, 1985. 103 с.
23. Хубларян М.Г., Найденов В.И. // Воды суши: проблемы и решения. М., 1994. С. 193.

Россинский Кирилл Илиодорович

(18.11.1904 – 13.9.1977)



Кирилл Илиодорович Россинский – крупный учёный, выдающийся инженер-гидротехник, специалист в области гидродинамики, термического и ледового режима водных объектов; кандидат технических наук.

К.И. Россинский родился 18 ноября 1904 г. в г. Москве, в семье младшего офицера Александровского военного училища. Учился в Ташкентском, затем – в Киевском реальном училище и средней школе (г. Омск), но не смог закончить школу из-за тяжёлой болезни. В 1922 г. поступил в Московский строитель-

ный техникум, который окончил в 1926 г. по специальности – дорожное строительство. Затем обучался на курсах повышения квалификации на строительстве Днепровской гидроэлектростанции им. В.И. Ленина (ДнепроГЭС), где получил специальность инженера-гидротехника и диплом, выданный Киевским строительным институтом в 1931 г.

Трудовая деятельность К.И. Россинского началась в 1923 г., ещё в годы обучения в техникуме: он был младшим мотористом в тренировочной эскадрилье воздушного флота РККА; летом 1925 г. стал учеником-практикантом на Витебском техническом участке водных путей НКПС (Народный комиссариат путей сообщения СССР); с декабря 1925 г. по 1927 г. работал в отделе изысканий Днепростроя, а в 1927 г. перешёл на строительство ДнепроГЭС, где начал работать в должности старшего техника, затем – дежурного инженера, инженера участка и производителя работ. В 1932 г. по окончании строительства ДнепроГЭС К.И. Россинский был переведён на строительство Ярославской ГЭС на р. Волге, где был руководителем

группы технического отдела, а позднее – заместителем начальника отдела исследований. В 1935 г. в связи с переносом створа гидроузла к г. Рыбинску он перешёл на работу в Волгострой – строительство Угличского и Рыбинского гидроузлов на р. Волге Наркомата внутренних дел СССР. В 1935–37 гг. К.И. Россинский работает начальником отделения исследований Волгостроя; в 1937–38 гг. – начальником проектно-исследовательского отдела строительства №201, затем начальником отделения Московского проектного сектора строительства Куйбышевского гидроузла. Это отделение было реорганизовано в 1940 г. в Московское проектное Управление Главгидростроя НКВД СССР, а в 1942 г. – в Гидропроект Министерства внутренних дел СССР (в дальнейшем – проектно-изыскательский и научно-исследовательский Институт «Гидропроект им. С.Я. Жука»).

В начале Великой отечественной войны (июль 1941 г.) К.И. Россинский был командирован на оборонительные работы, весной 1942 г. был ранен и после выздоровления вернулся в Гидропроект, где более 20 лет (1944–65 гг.) работал начальником отдела.

Огромный опыт практической работы и большой интерес к научной деятельности позволил Кириллу Илиодоровичу перейти к фундаментальным исследованиям в области формирования речных русел. Он начал эту работу ещё в лаборатории Волгостроя, а затем продолжал на протяжении всей своей жизни. В 1952–57 гг. параллельно с проектной деятельностью К.И. Россинский работал по совместительству заведующим лабораторией русловых процессов Секции по научной разработке проблем водного хозяйства Академии наук СССР.

К.И. Россинский сформулировал основные положения динамики русла, выявил важнейшие закономерности движения речных наносов, показал роль грядового движения наносов в формировании речных русел. Глубокая эрудиция в этой области наряду с тонким пониманием физических основ динамики реальной жидкости позволили ему в 1950-е гг. разработать эффективный метод расчёта русловых деформаций в нижних бьефах гидроэлектростанций. В 1956 г. К.И. Россинский защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук, посвящённую расчёту русловых процессов, вызываемых на реках искусственным изменением их режима.

Другое направление научных интересов К.И. Россинского было посвящено изучению термического и ледового режима рек, каналов и водохранилищ. Кирилл Илиодорович глубоко исследовал и описал процессы теплопереноса и ледовые явления в указанных водных объектах, разработал методику их расчёта, указал основные закономерности изменений, вносимых водохранилищами в зимний режим рек.

В 1965 г. он становится начальником сектора гидрофизики Московской лаборатории Государственного гидрологического института Гидрометслужбы СССР. Осенью 1968 г. К.И. Россинский как высококвалифицированный специалист по вопросам формирования речных русел и зимнего режима рек был приглашён в Институт водных проблем АН СССР (в порядке перевода) на должность заведующего отделом гидрофизики.

К.И. Россинский был одним из организаторов Института; здесь он продолжал и развивал основные направления своей научной деятельности. Под руководством Кирилла Илиодоровича выполнялись обширные исследования динамики и термики рек и водохранилищ, использованные, в том числе, и в работах Института по научному обоснованию крупной народнохозяйственной программы территориального перераспределения водных ресурсов.

К.И. Россинский – автор и соавтор более 70 научных работ. Следует особо отметить капитальный труд «Гидрологические основы речной гидротехники» (1950 г.), удостоенный в 1951 г. Сталинской премии третьей степени. Авторам этой работы: С.Н. Крицкому, М.Ф. Менкелю, К.И. Россинскому, Я.Д. Гильденблату, В.Р. Казаку, Д.В. Коренистову, И.А. Кузьмину было присвоено звание лауреатов Государственной премии.

К.И. Россинский был автором и ответственным редактором Сборников научных трудов: «Движение наносов в открытых руслах» (1970 г.), «Динамика и термика речных потоков» (1972 г.); «Динамика и термика рек» (1973 г.) и монографии «Термический режим водохранилищ», опубликованной в издательстве «Наука» (1975 г.). В 1980 г. (уже после его ухода из жизни) была издана монография: К.И. Россинский, В.К. Дебольский. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 215 с.

В числе наиболее значимых публикаций К.И. Россинского в период работы в Институте можно отметить следующие: Россин-

ский К.И., Любомирова К.С. «Основные закономерности движения речных наносов» // «Водные ресурсы», №1, 1972; Россинский К.И., Олевинская С.К., Пивоваров А.А. Экспериментальные исследования влияния сальтирующих наносов на кинематику потока // «Водные ресурсы», №2, 1973; Россинский К.И. Расчет движения речных наносов // Труды Гидропроекта, 1973. Сб. 30.

Научные работы К.И. Россинского всегда отличались физической обоснованностью и ясной теоретической трактовкой при неизменной конкретной направленности конечных результатов. Вся его жизнь была тесно связана со становлением и развитием отечественной гидротехнической науки, он прошёл славный трудовой путь от техника-строителя до учёного с мировым именем, широко известного не только в нашей стране, но и за рубежом.

За заслуги в период Великой Отечественной войны К.И. Россинский был награждён медалями: «За оборону Москвы» (1946 г.), «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» (1946 г.); юбилейной медалью «30 лет Победы в Великой Отечественной войне» (1975 г.).

Инженерная и научная деятельность К.И. Россинского удостоена высоких государственных наград – ордена «Трудового Красного Знамени» (за проектирование Волго-Донского канала, 1952 г.), 2-х орденов «Знак Почёта» (за проектирование Куйбышевского гидроузла на р. Волге, 1958 г.) и в связи с 250-летием Академии наук СССР (1975 г.); медали «В память 800-летия Москвы» (1948 г.).

В.К. Дебольский (ИВП РАН)

Термический режим и ледяной покров на водоемах и водотоках¹

К.И. Россинский

Роль ледяного покрова в зимнем термическом режиме водоемов

Ледяной покров, меняя свою толщину в зависимости от изменения метеорологической обстановки и притока тепла от воды к подводной поверхности, поддерживает на поверхности воды постоянную, равную нулю температуру и тем изолирует водоем от влияния атмосферы. В термическом режиме водоема ледяной покров выполняет роль регулятора зимнего теплообмена между водой и атмосферой.

В природе в одинаковых метеорологических условиях толщина льда оказывается различной в пределах одного и того же водоема. Хорошо известен факт образования более мощного ледяного покрова на стоячей воде, чем на быстро текущих реках. На речных перекатах лед тоньше, чем на глубоких плесах, и нередко на первых образуются проталины и полыньи. Наружная поверхность ледяного покрова в большинстве случаев не соприкасается непосредственно с атмосферой. Обычно их разделяет слой снега, мощность которого тесно связана с толщиной поддерживающего его льда. В силу этого зимний покров водоемов должен рассматриваться как сложная двухслойная система, оба компонента которой совместно выполняют функции регулятора теплообмена воды с атмосферой. Механические и термические свойства каждого из слоев, составляющих систему, как известно, резко различны. Лед обладает значительной механической прочностью, являясь в то же время относительно хорошим проводником тепла. Снег совершенно лишен механической прочности и способен самостоятельно держаться на воде, но зато теплопроводность его ничтожна, в особенности в первое время после его выпадения. Физическими свойствами льда и снега определяется распределение функций между этими слоями. Снег принимает на себя основную долю теплозащитных функций, тогда как лед выполняет роль плота, поддерживающего снеговой покров.

¹ Россинский К.И. Термический режим и ледяной покров на водоемах и водотоках // В кн. Россинский К.И. Термический режим водохранилищ. Изд. Наука. 1975 г стр. 148–154

Как известно, удельный вес льда, равный $0,92 \text{ г/см}^3$, лишь немногим отличается от веса воды. При полном отсутствии внешней нагрузки на верхнюю поверхность ледяной плиты последняя возвышается над уровнем воды всего лишь на $0,08$ своей толщины.

Достаточно нагрузить лед соответствующим (относительно незначительным) весом, чтобы плавучесть его была исчерпана полностью. По этой причине ледяной покров в большинстве случаев не способен поддерживать все количество выпадающего на него снега. Обычно наблюдаемая высота слоя последнего почти всегда оказывается максимально возможной по условиям грузоподъемности ледяного покрова. Снего-ледяной покров как бы находится в состоянии, близком к предельному равновесию.

По ходу зимы в условиях переменной метеорологической обстановки это равновесие часто нарушается. Увеличение веса снега, вызываемое снегопадами, приводит к перегрузке ледяного покрова. Изменение толщины ледяного покрова, сопутствующее колебаниям температуры воздуха, влечет за собой или перегрузку льда в случае утоньшения последнего, или появление избыточной плавучести при его утолщениях.

Первым последствием перегрузки является проникновение на поверхность льда воды, выступающей сквозь трещины, всегда имеющейся в ледяном покрове. Эта вода пропитывает нижние слои снега. Тем самым достигается приведение нагрузки на лед в соответствие с его грузоподъемностью, поскольку, погружаясь в воду, снег теряет свой вес и даже приобретает плавучесть. Одновременно с восстановлением статического равновесия вступают в действие и термические факторы. Термический режим снего-ледяного покрова в условиях перегрузки льда снегом определяется тем, что вся зона пропитанного водой снега и льда, расположенная между поверхностью воды и нижней поверхностью льда, оказывается областью постоянной температуры, равной 0°C . Следствием этого является равенство нулю термических градиентов в пределах всей указанной зоны и, следовательно, невозможность передачи сквозь снего-ледяной покров тепла, поступающего к нижней поверхности льда из толщи воды. Возникающее отсюда противоречие разрешается тем, что вода и атмосфера как бы обмениваются при посредстве снего-ледяного покрова скрытым теплом льдообразования. Процесс этот происходит следующим

щим образом. На границе раздела вода–лед одновременно лед растепляется, поглощая при этом тепло, подводимое водой, а вода замерзает, выделяя при этом и отдавая атмосфере соответствующее количество тепла (которое и удаляется сквозь толщу сухого снега); процесс продолжается до тех пор, пока вся толща пропитанного водой снега не обратится в лед и снего-ледяной покров снова не вернется в состояние предельного равновесия.

На основании сказанного можно сделать следующий основной вывод, касающийся соотношения толщин снегового и собственно ледяного покровов: толщина снега в общих чертах следует в своих колебаниях за толщиной льда. Утоньшение ледяного покрова сопровождается одновременным уменьшением толщины лежащего на нем слоя снега. Тенденция к установлению соответствия между толщинами льда и снега проявляется и в случаях утолщения ледяного покрова. Последний, увеличиваясь в размерах, оказывается способным поддерживать более мощный слой снега, чем тот, который находился на нем до утолщения. Возникающее в связи с этим несоответствие между весом снегового покрова и грузоподъемностью ледяной толщи покрывается ближайшими снегопадами.

Соотношения между толщинами ледяного и снегового покровов, отвечающие условиям предельного статического равновесия, являются функциями только удельных весов льда и снега и не зависят от термического режима воды и атмосферы. Путем элементарных математических выкладок можно показать, что толщины льда и снега приблизительно пропорциональны друг другу. Если принять объемный вес снега в $0,2 \text{ т/м}^3$, то отношение толщин снега и льда получится равным $h_c/h_\lambda=0,4$.

Из пропорциональности толщин снега и льда вытекает важное для дальнейшего анализа следствие: при заданных величинах пропускаемого установившегося теплового расхода и температуры воздуха температура верхней поверхности льда оказывается постоянной независимо от толщины снего-ледяного покрова.

Наблюдения за режимом ледяного покрова рек, озер и каналов подтверждают высказанные выше положения. Замечено, например, что ледяной покров на реках и озерах в значительной части состоит из так называемого «снегового» льда.

Доказательством правильности намеченной выше картины взаимодействия льда и снега может служить также нередко встречающееся явление двойного ледяного покрова, образованию которого способствуют снегопады большой интенсивности. Перегружая ледяной покров, такие снегопады заставляют лед глубоко погружаться под воду. Выступающий на поверхность значительный слой воды с течением времени образует верхний ярус льда, более или менее долго не смерзающийся с нижним льдом.

Влияние термического и гидравлического режимов потока на толщину снего-ледяного покрова

Толщина снего-ледяного покрова всегда стремится принять такие размеры, при которых способность льда пропускать тепло от воды к атмосфере соответствует теплопритоку, поступающему к нижней поверхности льда. Если метеорологическая обстановка продолжительное время сохраняется неизменной, а в водоеме устанавливается стационарный тепловой режим, то толщина льда стремится к значению, удовлетворяющему равенству:

$$h_{\lambda} = \lambda_{\lambda} \cdot \tau_{\text{лп}} / S_{\lambda} \quad (1),$$

где h_{λ} – толщина льда, $\tau_{\text{лп}}$ – температура верхней поверхности льда, λ_{λ} – коэффициент теплопроводности льда.

При установившемся теплообмене и неизменности атмосферных условий толщина ледяного покрова определяется расходом тепла S_{λ} , поступающим к подледной поверхности. Чем больше расход тепла, тем меньше толщина ледяного покрова.

В проточных водоемах к подледной поверхности, кроме тепла, выделяемого водой при остывании, или донного тепла, подводится также тепло, возникающее в толще самого потока в процессе диссипации энергии гидравлических сопротивлений. Поэтому ледяной покров в проточных водоемах должен при прочих равных условиях оказываться более тонким, нежели в застойных, что и подтверждается наблюдениями.

Зависимость толщины ледяного покрова от размеров теплопритока к его нижней поверхности позволяет установить определенную закономерность в распределении этой характеристики по длине потока. Изменения толщины льда оказываются связанными с чередованием областей нагревания и охлаждения воды. Первые соот-

ветствуют повышенной толщине льда, так как в этом случае нижняя его поверхность получает меньше тепла, чем отдает дно, поскольку некоторое количество тепла затрачивается на нагрев воды. Обратное положение наблюдается на участках, в пределах которых происходит охлаждение потока. Теплоприток к подледной поверхности здесь несколько увеличивается за счет тепла, освобождающегося при охлаждении воды, что влечет за собой уменьшение толщины льда. Нагревание или охлаждение воды вдоль водотока, как показано выше, может происходить в местах перемены его гидравлического режима. Вода, поступая на участок водотока, отличающийся от вышерасположенного большей (или меньшей) скоростью течения, постепенно охлаждается (или соответственно нагревается), стремясь достичь температуры, отвечающей при новых скоростных условиях стационарному тепловому режиму.

На всем протяжении участка, где происходит охлаждение воды, теплоприток к нижней поверхности льда превышает теплоотдачу дна. Максимальная интенсивность теплопритока к нижней поверхности льда соответствует переходному сечению, в котором изменяется гидравлический режим потока (место перехода от одного участка к другому). Далее в пределах нижележащего участка теплоприток постепенно падает, приближаясь к своему нормальному уровню, т.е. к теплоотдаче дна. В соответствии с этим наиболее тонкий лед должен наблюдаться как раз на границе между обоими участками, там, где широкое и глубокое русло сменяется узким и мелким. По мере удаления от границы вниз по течению вместе с уменьшением расхода тепла, поступающего к поверхности льда, толщина последнего выравнивается до обычных размеров, отвечающих равенству (1).

По такому же закону образуется утолщение ледяного покрова в районе перехода водотока от узкого и мелкого русла к широкому и глубокому. В этом случае утолщение льда достигает наибольшей величины на границе сопряжения участков. Ниже по течению лед, постепенно уменьшаясь в толщине, достигает нормальных размеров там, где заканчивается нагревание потока.

Таким образом, колебание толщин ледяного покрова по длине водотоков находится в тесной связи с неравномерностью их гидравлического режима. При этом уменьшение толщины льда, сопут-

ствующее областям охлаждения погона, проявляется с большой резкостью, чем увеличение.

Все выводы, касающиеся толщины ледяного покрова и ее изменений, в силу изложенного в предыдущем параграфе, в равной мере относятся и к снеговому покрову.

Для иллюстрации сказанного на рис. 1 показаны продольные профили снего-ледяного покрова и термический режим канала им. Москвы.

Как видно из рис. 1, на границе водохранилища и канала, там, где теплоприток к поверхности льда достигает максимального значения, о чем можно судить по термическому градиенту продольного температурного разреза, толщина снего-ледяного покрова уменьшается до минимальных размеров, составляющих всего лишь несколько сантиметров. Далее наблюдается восстановление мощности ледяного и снегового покровов. Приведенный на том же

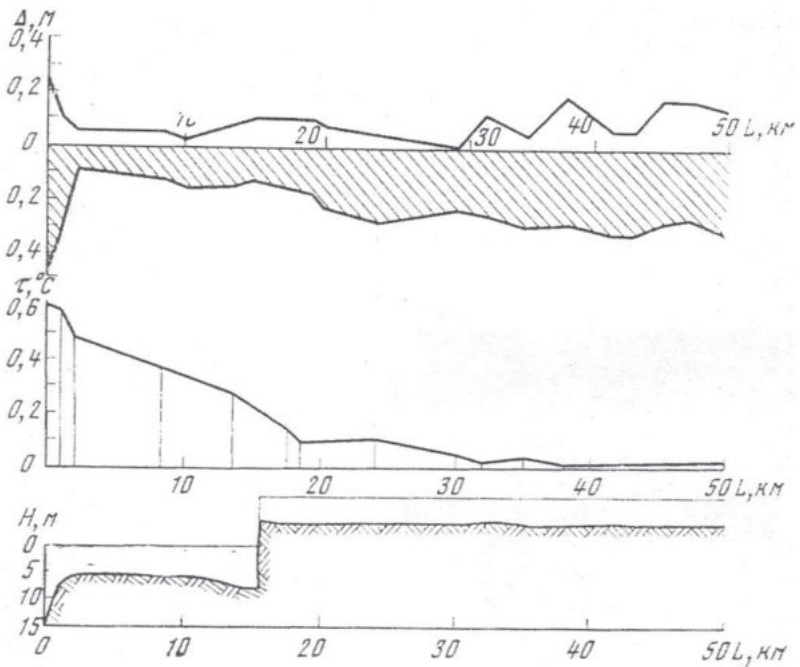


Рис. 1. Продольный профиль, разрез ледяного покрова и температура воды в месте выхода канала из Ивановского водохранилища

рисунке продольный температурный разрез доказывает, что нормальная толщина льда и снега устанавливается в том месте, где заканчивается остывание воды.

Образование полыней

Анализ режима снего-ледяного покрова позволяет установить некоторые положения, касающиеся образования на водоемах незамерзающих участков: полыней и проталин. Из рассмотренного выше вытекает, что образование полыней возможно в местах увеличения скорости по длине водотока, где тепло, накопленное на вышележащем участке, обладающем меньшей скоростью течения, с повышенной интенсивностью подводится к подледной поверхности. На таких участках в случае достаточно большой интенсивности подвода тепла снизу ледяной покров может исчезнуть совсем. Появление полыней можно себе представить также и на реках с весьма быстрым течением, где достигает значительной интенсивности повышенное выделение тепла, связанное с работой сил сопротивления. Однако течение, способное выделить столь большое количество тепла, должно сопровождаться настолько бурным состоянием потока, что формирование ледяного покрова окажется затрудненным в силу непосредственно механических воздействий.

Для существования устойчивых полыней термического происхождения необходимо наличие условий:

- вызывающих растопление льда на участках, успевших им покрыться, и
- препятствующих образованию нового льда на освободившихся от него или не успевших замерзнуть участках.

Первое условие, которым определяется возможность исчезновения ранее образовавшегося ледяного покрова, находится из соотношения между теплопритоком и теплоотдачей водоемов, покрытых льдом. Как это отмечалось выше, уменьшение толщины последнего происходит в тех случаях, когда теплоприток превышает теплоотдачу. Процесс может закончиться полным исчезновением ледяного покрова, если указанное соотношение сохраняется неизменным вплоть до достижения льдом той предельной толщины, при которой по условиям механической прочности он уже не может более удерживаться на водной поверхности. Таким образом, условие

образования полыньи на участке, покрытом ледяным покровом, определяется неравенством:

$$(S_{\lambda})_{h\min} < S_{\lambda}$$

где теплоотдача $(S_{\lambda})_{h\min}$ отвечает минимально возможной толщине льда. Второе предельное условие может быть выведено на основе анализа явлений замерзания не покрытого льдом участка водной поверхности. Лед образуется в том случае, если приток тепла из водной толщи недостаточен для балансирования теплоотдачи в атмосферу при охлаждении водной поверхности до 0°C (при такой степени охлаждения термический градиент и соответственно теплоприток в водной толще возрастают, а аналогичные характеристики атмосферы понижаются до предела). Отсюда условие затягивания льдом полыньи может быть сведено к неравенству:

$$S_0 > (S_0)_{\tau=0}$$

где $(S_0)_{\tau=0}$ – предельно возможный теплоприток из толщи воды к открытой водной поверхности, имеющей температуру 0°C .

При заданной метеорологической и гидравлической обстановке величины теплопритока и теплоотдачи S_0 , S_{λ} и $(S_0)_{\tau=0}$ попарно связаны между собой соотношениями, вытекающими из физической сущности рассматриваемых явлений, а именно:

1. Теплоотдача сквозь ледяной покров увеличивается по мере уменьшения его толщины, стремясь к величине теплоотдачи открытой водной поверхности вместе с приближением толщины льда к нулевым значениям. Основываясь на этом, теплоотдачу, отвечающую минимально возможной толщине льда, представляется: правильным приближенно принять равной S_0 , т.е.

$$(S_{\lambda})_{h\min} = S_0.$$

2. Теплоприток к открытой водной поверхности $(S_0)_{\tau=0}$ больше теплопритока к нижней границе льда S_{λ} :

$$(S_0)_{\tau=0} > S_{\lambda}.$$

Такое соотношение теплопритоков объясняется тем, что турбулентный обмен между горизонтальными слоями жидкости протекает более интенсивно при отсутствии ледяного покрова, чем при его наличии.

Сопоставляя между собой написанные выше неравенства, можно различные возможные в природе сочетания значений теплоприто-

ка и теплоотдачи свести к трем основным случаям, характеризующим состояние водной поверхности:

1. Ледяной покров образуется, если он отсутствовал, и удерживается, если он ранее образовался:

$$S_0 > (S_0)_{\tau=0} \quad (2)$$

2. Полынья образуется, если она отсутствовала, и поддерживается, если она образовалась:

$$S_A > S_0 \quad (3)$$

3. Ледяной покров удерживается, если он образовался, полынья сохраняется, если она существовала:

$$(S_0)_{\tau=0} > S_0 > S_A \quad (4)$$

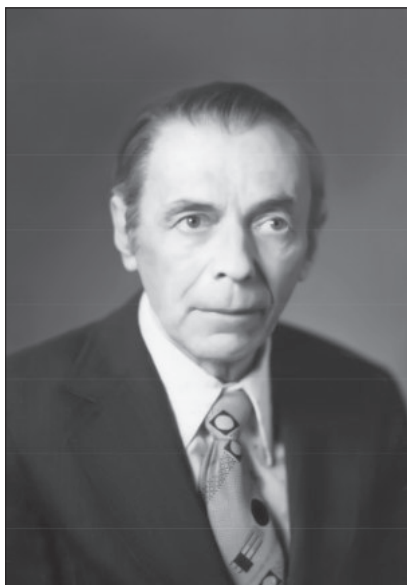
Следует отметить, что последнее неравенство в той части его, которая определяет условие незамерзания полыньи, не охватывает одного специфического случая. Этот случай может возникнуть в результате наступательного движения ледяной кромки от нижней (по течению реки) границы полыньи. Близ этой границы теплоприток из толщи воды к ее поверхности снижается из-за падения турбулентности потока у границы ледяного покрова. При этом, несмотря на соблюдение неравенства (4), полынья может закрыться. Это произойдет, если температура воды, поступающей на незамерзший участок из-под льда, окажется меньшей, чем температура воды на стабилизировавшейся кромке. Величины, входящие в выражения (2), (3) и (4), связаны с метеорологическими факторами и непрерывно колеблются. В силу этого соотношения, выражаемые рассматриваемыми неравенствами, могут по ходу зимы многократно изменяться.

Фидман Борис Александрович

(12.12.1909 – 4.10.1985)

Борис Александрович Фидман – известный учёный, один из крупнейших специалистов в области гидравлики, гидродинамики, турбулентности водных потоков и теории наносов, доктор технических наук.

Б.А. Фидман родился 12 декабря 1909 г. в г. Ленинграде в семье инженера. В 1926 г. окончил среднюю школу в г. Москве. В 1927 г. поступил на водный факультет (речное отделение) Московского института инженеров транспорта им. Дзержинского, который окончил в 1931 г., получив квалификацию инженера путей сообщения по специальности – гидротехника.



После окончания института был направлен в проектное бюро «Волгострой» на должность инженера. В 1930–32 гг. Б.А. Фидман работал в проектных организациях по изысканию и проектированию гидротехнических и гражданских сооружений.

В 1933–36 гг. Борис Александрович был увлечён преподавательской и научно-исследовательской деятельностью в Московском инженерно-строительном институте, а затем в Московском геологоразведочном институте, где работал ассистентом и преподавал курс гидравлики.

В 1936 г. Б.А. Фидман принимал участие в создании лаборатории физической гидродинамики Энергетического института АН СССР и перешёл на работу в эту лабораторию на должность научного сотрудника, в которой работал до июня 1941 г.

В 1940 г. была опубликована его первая серьёзная научная работа: «Об экспериментальном определении некоторых статистичес-

ких характеристик турбулентности», Ж. Известия Энергетического института АН СССР, 1940, вып.1, 2 п.л.

С начала Великой Отечественной войны Б.А. Фидман находился в рядах действующей Советской Армии: с марта 1942 г. по май 1945 г. участвовал в боевых действиях на различных фронтах, был командиром взвода, командиром роты, в 1943 г. воевал на Курской дуге. Победу инженер-капитан Б.А. Фидман встретил в Праге.

После демобилизации в январе 1946 г. Б.А. Фидман вернулся к научной работе в Институт механики АН СССР, куда была переведена лаборатория гидродинамики, оставленная им в связи с уходом на фронт. В дальнейшем в связи с переводом этой лаборатории (получившей название лаборатории русловых процессов) в другие организации Борис Александрович работал в её составе в Институте географии АН СССР (1947–51 гг.), а затем – в Секции водохозяйственных проблем АН СССР (1951–58 гг.).

В этот период научная деятельность Б.А. Фидмана была посвящена гидродинамическим исследованиям. В 1947 г. он защищает диссертацию и получает учёную степень кандидата технических наук; в 1948 г. утверждён в учёном звании старшего научного сотрудника по специальности «Динамика русловых потоков».

В дальнейшем Б.А. Фидман продолжил исследования по динамике турбулентных потоков. В 1958 г. он защищает докторскую диссертационную работу (степень доктора технических наук присуждена решением ВАК в 1959 г.). Глубина выполненных в работе исследований и полученные результаты соответствуют современному уровню и до сих пор служат основой для развития идей в этой области.

В 1958–61 гг. Б.А. Фидман работал в должности старшего научного сотрудника Энергетического института АН СССР, в 1961–65 гг. перешёл в Институт горного дела Министерства угольной промышленности СССР. В этот период он публикует научные статьи о распределении твёрдых частиц в вертикальном потоке жидкости, теоретических методах исследования гидросмесей, уравнениях гидромеханики для многокомпонентной турбулентной среды

В 1965 г. избирается по конкурсу на должность старшего научного сотрудника Московской лаборатории Государственного гидрологического института, в которой проработал до 1968 г.

Осенью 1968 г. Б.А. Фидман был приглашён (в порядке перевода) в Институт водных проблем АН СССР (ИВП АН СССР). Борис Александрович принял самое деятельное участие в его организации и практически до последнего дня своей жизни работал в Институте: сначала – в должности старшего научного сотрудника отдела гидрофизики, с 1974 г. – в должности заведующего сектором речной гидродинамики этого отдела, в 1977–84 гг. исполнял обязанности заведующего отделом.

Всего Б.А. Фидманом опубликовано немногим более 40 научных работ, однако это были поистине фундаментальные труды в области турбулентности водных потоков, переноса в них примесей, теории транспорта наносов и др. Он чрезвычайно ответственно относился к публикациям своих научных результатов, всегда можно было быть абсолютно уверенным в их достоверности и обоснованности. Б.А. Фидман внёс существенный вклад в теорию русловых потоков и речную гидродинамику, но, к сожалению, в очень незначительной степени пропагандировал свои результаты. Борису Александровичу была присуща удивительная скромность и даже скептицизм по отношению к своей научной деятельности.

За заслуги в период Великой Отечественной войны награждён орденом Отечественной Войны II степени, 2-мя орденами «Красная Звезда», медалями: «За боевые заслуги», «За победу над Германией», «20 лет победы над Германией» (1965 г.), «30 лет Победы в Великой Отечественной войне» (1941–1945 гг.), а также медалью «В память 800-летия Москвы».

Б.А. Фидман был талантливым учёным, интеллигентным, благожелательным, скромным, замечательным человеком.

В.К. Дебольский (ИВП РАН)

О превращениях энергии в турбулентном потоке жидкости, несущем тяжелые взвешенные частицы¹

Б.А. Фидман

На поддержание наносов во взвешенном состоянии тратится часть потенциальной энергии жидкости, причем передача энергии твердым частицам допускается только при восходящих движениях последних. Потенциальная энергия твердых частиц, отдаваемая при их осредненном движении, согласно этой концепции, в работе взвешивания не участвует; эта энергия вместе с энергией, освобождаемой в нисходящих турбулентных движениях твердых частиц, диссипируется, то есть полностью переходит в теплоту посредством вязкого трения.

Такое разделение функций жидкой и твердой фаз в энергетическом балансе потока, строго говоря, не является обоснованным, но может быть оправданно в качестве известного приближения, если к предположениям Великанова сделать одно существенное добавление, а именно: учесть опущенную в гравитационной теории диссипацию, сопровождающую процесс передачи энергии жидкости частицам наносов.

При отсутствии такого добавления исходные физические предпосылки теории не отражают, на наш взгляд, существа процесса, даже в случае мелких частиц и малых значений концентрации, когда предположение о необратимости перехода энергии от жидкости к частицам может быть принято как приближенное.

Рассмотрим вкратце основные уравнения, полученные Великановым из принятых им предположений.

В качестве одного из основных уравнений в гравитационной теории фигурирует уравнение энергии жидкой фазы для установившегося равномерного плоского потока. Оно записывается следующим образом:

$$\rho g i \bar{u}(1-\bar{s}) = \frac{d}{dy} [\rho(1-\bar{s})\bar{u}'\bar{v}] \bar{u} + (\rho_t - \rho) g w \bar{s}(1-\bar{s}). \quad (1)$$

Левая часть равенства выражает работу силы тяжести в единицу времени; первому члену правой части придается смысл работы сил сопротивления, а второму – работы взвешивания.

¹ Фидман Б.А. О превращениях энергии в турбулентном потоке жидкости, несущем тяжелые взвешенные частицы // В кн. Б.А. Фидман. Турбулентность водных потоков. Ленинград, 1991, Гидрометеиздат, с. 180 – 188.

Уравнение энергии для твердой фазы, используемое в гравитационной теории, имеет вид:

$$\rho_{\pm} g i \bar{u} \bar{s} = \frac{d}{dy} [\rho_{\pm} \bar{s} \bar{u}' \bar{v}'] \bar{u} - (\rho_{\pm} - \rho) g w \bar{s} (1 - \bar{s}), \quad (2)$$

причем здесь второму члену правой части.придается смысл дополнительной работы силы тяжести в связи с осаждением частиц в потоке; два других члена в этом уравнении по смыслу аналогичны соответствующим членам уравнения (1).

Истолкование, даваемое в гравитационной теории величинам, входящим в правые части уравнений (1) и (2), представляется нам совершенно не убедительным. В самом деле, нельзя, например, согласиться с тем, что величина $(\rho_{\pm} - \rho) g w \bar{s} (1 - \bar{s})$ представляет собой работу силы тяжести, действующей на частицы наносов, так как эта сила, будучи консервативной, очевидно, не может совершать никакой иной работы, кроме учтенной уже в левой части уравнения (2). Далее, первые члены в правой части (1) и (2), имеющие, по существу, смысл величин $(d\tau/dy) \bar{u}$ (τ – сила трения), вовсе не исчерпывают работы сил трения; более того, на небольшом расстоянии от дна член такого типа выражает лишь малую долю полной работы сил трения, равной

$$\frac{d}{dy} (\bar{u} \tau) = \frac{d\bar{u}}{dy} \tau + \frac{d\tau}{dy} \bar{u}, \quad (3)$$

а наиболее существенная часть этой работы $\frac{d\bar{u}}{dy} \tau$ оказывается упущенной. Наряду с этим указанная ранее весьма важная в балансе энергии величина – диссипация энергии – не находит в гравитационной теории ясного выражения.

В связи с высказанными замечаниями использование основных уравнений гравитационной теории (1) – (2) нельзя признать правомерным.

Заметим еще, что величина $(\rho_{\pm} - \rho) g w \bar{s} (1 - \bar{s})$, выражающая в гравитационной теории работу взвешивания, при внесении небольшой поправки должна представлять, по существу, как раз диссипацию энергии $(\rho_{\pm} - \rho) g w \bar{s}$, вызываемую перемещением частиц массой $\rho_{\pm} \bar{s}$ со скоростью w относительно жидкости при условии, что влиянием на диссипацию турбулентных пульсаций величины w можно пренеб-

речь. Хотя множитель $1-\bar{s}$ при малых значениях \bar{s} не играет существенной роли, все же с методологической точки зрения представляется важным отметить, что в выражение для диссипации (или, что то же, работы взвешивания) должна входить именно скорость w , выражающая реальное среднее относительное перемещение вещества частиц в жидкой среде, а не условная кинематическая величина $w(1-\bar{s})$, представляющая собой формальный результат осреднения скорости, отнесенной к общему объему частиц, содержащихся в единице объема смеси.

Обратимся теперь к некоторым затруднениям принципиального характера, возникающим в рассматриваемой задаче при использовании соображений о балансе энергии.

Минуя отдельную запись баланса энергии для двух фаз, являющихся, строго говоря, необоснованной, составим, прежде всего, дифференциальное уравнение энергии для потока в целом, т.е. для движущейся смеси, включающей жидкую и твердую фазы. Отметим относящиеся к такому потоку величины индексом 1. Работа внешних сил на единицу объема в единицу времени

$$\rho_1 g u_1 i_1 + \frac{d}{dy} (\bar{u}_1 \tau_1)$$

на основании уравнения движения

$$\rho_1 g i_1 = \frac{d\tau_1}{dy}. \quad (4)$$

будет равна $\frac{d\bar{u}_1}{dy} \tau_1$.

Часть этой энергии (Δ_1) диссипирует в данной точке, тогда как другая часть ее (T_1) может переходить вследствие турбулентной диффузии энергии пульсации из данной точки в ее окрестности или, наоборот, приходить в нее извне:

$$\frac{d\bar{u}_1}{dy} \tau_1 = \ddot{A}_1 + T_1. \quad (5)$$

Известные из литературы численные оценки турбулентной диффузии энергии показывают, что она имеет различные знаки в пристенной области и вдали от стенки, а ее абсолютное значение может быть того же порядка, что и локальной диссипации. Пренебрежение турбулентным переносом энергии T_1 в уравнении (5) представляется в связи с этим недопустимым. С другой стороны, для вычис-

ления этой величины необходимо иметь детальные данные о поле скоростей, включая турбулентные пульсации, причем не только для жидкой, но и для твердой фаз. Невозможность использования уравнения (5) ввиду отсутствия таких данных и составляет, по-видимому, основное методологическое затруднение в построении теории, которая опиралась бы на дифференциальные уравнения энергии, и которую можно было бы назвать энергетической.

Для оценки суммарных величин, характеризующих баланс энергии в потоке в целом, следует проанализировать распространенное на всю глубину h интегральное соотношение для энергии, в которое величина T_1 не войдет, так как в силу отсутствия притока энергии через границы

$$\int_h T_1 dy = 0. \quad (6)$$

Обозначая теперь чертой сверху величины, осредненные по глубине h , и подразумевая, что, кроме того, всегда выполняется осреднение по времени, будем иметь²

$$\dot{\bar{A}}_1 = \rho g i_1 \bar{u}_1 + g i_1 (\rho_+ - \rho) \bar{s} \bar{u}_1 = \rho g i_1 [\bar{u}_1 + (\rho_+ / \rho - 1) \bar{s} \bar{u}_1]. \quad (7)$$

Теперь представим себе поток, протекающий в неразмываемом ложе и не несущий взвешенных частиц, причем пусть средняя по сечению его скорость \bar{u} равна соответствующей скорости жидкости в рассмотренном ранее потоке, несущим наносы: $\bar{u}_1 = \bar{u}$.

Средняя по глубине диссипация для потока без примеси наносов будет

$$\ddot{\bar{A}}_1 = \rho g i \bar{u} - \rho g i (\bar{u}_1 - \bar{s} \bar{u}_1), \quad (8)$$

а разность диссипации двух рассмотренных потоков

$$\Delta \bar{\bar{A}} = \bar{\bar{A}}_1 - \bar{\bar{A}} = \rho g \bar{u} (i_1 - i) + \rho_+ g i_1 \bar{s} \bar{u}_1. \quad (9)$$

Отнеся эту величину к единице веса протекающей жидкости, найдем, что

$$\frac{\Delta \bar{\bar{A}}}{\rho g \bar{u}} = i_1 - i + i_1 (\rho_+ / \rho) \bar{s}_p, \quad (10),$$

² Полагаем приближенно, что продольные скорости жидкости и частиц наносов одинаковы, и пренебрегаем незначительной корреляцией между величинами u_1 и S , которая в этих условиях отлична от нуля и притом отрицательна. Отметим еще, что записываемое таким образом выражение для $\dot{\bar{A}}_1$ не противоречит уравнению (5), так как

$$\dot{\bar{A}}_1 = \rho g i_1 \bar{u}_1 = - \frac{d\tau_1}{dy} u_1 = \frac{du_1}{dy} \tau_1.$$

где $S_p = \frac{\overline{su_*}}{u_1}$ – концентрация взвеси, вычисляемая по расходу наносов $\overline{su_1}$ и расходу жидкости $\overline{u_1}$, i_1 и i – гидравлический уклон для одного и другого потоков.

Заметим, что зависимость добавочной диссипации $\Delta \overline{\overline{A}}$ от величин i_1 и i не может быть сведена, как это иногда делается, к простой пропорциональности ее разности $(i_1 - i)$.³

В развитие основного предположения гравитационной теории введем теперь гипотезу, представляющуюся довольно правдоподобной, по крайней мере, в условиях не очень значительной концентрации взвешенных частиц. Допустим, что разница скорости рассеяния энергии, выражаемая величиной ΔD , целиком обусловлена диссипацией, вызываемой обтеканием частиц жидкостью. При этом использование соотношения (9) для практических расчетов не могло бы встретить существенных затруднений, если бы можно было принять простейший прием вычисления дополнительной диссипации по средней скорости осаждения, игнорирующей турбулентные движения твердых частиц относительно жидкости, связанные с их инерционностью. Неприемлемость такого допущения за исключением, быть может, области весьма малых размеров частиц и небольших скоростей течения составляет, по нашему мнению, второе принципиальное затруднение энергетической теории, существенное как при интегральном, так, очевидно, и при затронутом выше дифференциальном методе описания.

В связи с невозможностью теоретического вычисления в общем случае диссипации при неустановившемся движении в жидкости твердых частиц единственно практически целесообразным следует считать приближенное решение этой задачи на основе экспериментального метода.

Постараемся установить состав физических величин, определяющих дополнительную диссипацию $\Delta \overline{\overline{A}}$, вызываемую наличием взвешенных тяжелых частиц, и сделаем попытку выяснить на основе простейших соображений о размерности обобщенный характер действующих между этими величинами связей. Вначале допустим ради упрощения, что поле турбу-

³ Легко показать, что из выражения $\Delta \overline{\overline{A}} = \rho g \overline{u}(i_1 - i)$ вытекает неестественное соотношение $\overline{\overline{A}} = (1 + s_p) \overline{\overline{A}} + (1 + 1/s_p) \Delta \overline{\overline{A}}$, согласно которому роль дополнительной диссипации $\Delta \overline{\overline{A}}$ должна уменьшаться с ростом концентрации.

лентных пульсаций скорости вполне характеризуется стандартом (по времени)

$$\sigma_v = \sqrt{V^2 - \bar{V}^2}$$

скорости жидкости (V – вектор скорости) и только одним геометрическим масштабом, представляющим собой размер турбулентных возмущений.

Средние характеристики турбулентного движения твердой взвешенной частицы должны зависеть от величин σ_v , l , размера частицы d , ее плотности $\rho_{\text{ч}}$, плотности и вязкости жидкости ρ и μ .

В стационарных (в среднем) условиях (на единицу объема частицы)

$$E_1 = (\rho \sigma_v^3 / d) \phi \left[\frac{l}{d}, \frac{\mu}{\rho d \sigma_v}, \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} \right], \quad (11)$$

где E_1 – средняя энергия, затрачиваемая в единицу времени на поддержание турбулентного движения частицы и рассеиваемая в теплоту; она представляет собой «инерционную» составляющую диссипации, причем вид функции ϕ зависит от формы частицы и характера изменений скорости V во времени, не учитываемого величиной σ_v . Принимая, что величина σ_v приблизительно пропорциональна динамической скорости $u_* = \sqrt{gh_i}$, а характерный размер турбулентных возмущений l приблизительно пропорционален глубине h , перепишем последнее соотношение в виде:

$$E_1 = \frac{\rho u_*^3}{d} f_1 \left(\frac{h}{d}, \frac{\rho d u_*}{\mu}, \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} \right). \quad (11)$$

Энергию, диссипируемую при равномерном осаждении твердой частицы относительно жидкости со скоростью w , представляющую «гравитационную» составляющую диссипации, можно определить по соотношению

$$E_2 = \frac{\rho w^3}{d} f_2 \left(\frac{\mu}{\rho d w}, \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho} \right), \quad (12)$$

причем вид функции f_2 зависит от формы частицы.

Отсюда

$$E = E_1 + E_2 = \rho \frac{u_*^3 f_1 + w f_2}{2}, \quad (13)$$

где E – полная энергия, расходуемая на поддержание движения частицы.

Согласно введенной выше гипотезе, средняя добавочная диссипация $\Delta \bar{A}$ в нашей упрощенной схеме однородной «одномасштабной» турбулентности будет

$$\Delta \bar{A} = \bar{s} E = \bar{s} \frac{\rho}{d} f_1 u_*^3 \left[1 + \frac{f_1}{f_2} \left(\frac{w}{w_*} \right)^3 \right]. \quad (14)$$

Как видим, добавочная диссипация, согласно этому выражению, должна быстро возрастать за счет увеличения ее турбулентной составляющей с ростом u_* , поскольку коэффициент f_2 можно считать лишь незначительно меняющимся в зависимости от u_* . В медленно текущих потоках, способных переносить в небольшом количестве лишь мелкие частицы, добавочная диссипация энергии может определяться в значительной мере гравитационной составляющей, однако при значительных скоростях течения и больших насыщениях, имеющих место, например, в гидротранспорте, турбулентная составляющая диссипации должна превалировать.

Можно полагать, что обнаруживаемое некоторыми измерениями значительное превышение добавочных потерь энергии на перенос частиц над величиной, вычисляемой по схеме равномерного осаждения, объясняется именно игнорированием турбулентной составляющей диссипации при таком способе расчета.

Отметим еще, что из сопоставления выражений (14) и (11) можно получить общее соотношение, например, такого вида⁴:

$$i_1 = \phi \left[\bar{s}, \frac{\bar{u}}{\sqrt{gd}}, \frac{\mu}{\rho d^{3/2} g^{1/2}}, \frac{\rho_*}{\rho}, \frac{h}{d} \right]. \quad (15)$$

При отсутствии влияния вязкости и при неизменной плотности это выражение упрощается:

$$i_1 = \phi \left[\bar{s}, \frac{\bar{u}}{\sqrt{gd}}, \frac{h}{d} \right]. \quad (16)$$

Затрата энергии на перемещение единицы смеси на единичное расстояние должна зависеть в этих условиях от концентрации, относительной крупности частиц и от числа $\frac{\bar{u}}{\sqrt{gd}}$, характеризующего соотношение свойств инерционности и размываемости потока.

⁴ Здесь принято $u_* = \sqrt{g h i}$; $\frac{u_*}{u} \approx \sqrt{\lambda} = f \left(\frac{h}{d} \right)$, $E_2 = \rho g^{3/2} d^{1/2} f_2 \left(\frac{\mu}{\rho d^{3/2} g^{1/2}}, \frac{\rho_*}{\rho} \right)$

В приведенных рассуждениях фигурируют величины, осредненные по глубине, причем в основу анализа положено, как указывалось, грубо упрощенное представление о структуре поля турбулентных скоростей. Поэтому рассмотренные соотношения должны выражать приближенно только связь между средними, «гидравлическими» параметрами, определяющими перенос потоком тяжелых взвесей. Более детальное исследование потребовало бы прежде всего уточнения исходного представления о турбулентном поле скоростей, для характеристики которого можно ввести спектральное разложение энергии турбулентных пульсаций σ_v^2 по масштабам возмущений $\eta=l/d$:

$$p(\eta)\delta\eta=\sigma_v^2(\eta, \eta+\delta\eta)/\sigma_v^2$$

где $\sigma_v(\eta, \eta+\delta\eta)$ – спектральная составляющая суммарной пульсации, отвечающая интервалу масштабов $(\eta, \eta+\delta\eta)$; $p(\eta)$ – спектральная плотность.

При этом для математического описания явления целесообразно воспользоваться аппаратом статистической теории колебаний с непрерывным спектром. Применение спектральных представлений о составе поля турбулентных пульсаций к русловому потоку и, в частности, к установившемуся течению в канале или лотке, предложенное первоначально Е.М. Минским, привело к качественному подтверждению положения М.А. Великанова о структурных формах турбулентности. На основе этих представлений в настоящее время можно предложить в порядке обсуждения следующие соображения относительно общей картины поля пульсаций.

В каждом слое $y=\text{const}$ существуют статистически стационарные пульсации, представляющие собой набор простейших колебаний различного масштаба (частоты). Спектральная функция $p(l/h)$, характеризующая распределение энергии между пульсациями разных масштабов, вообще говоря, различна на различном расстоянии y от дна. Спектр пульсаций в пристенном слое характеризуется меньшими средними размерами возмущений (более высокими частотами), чем на удалении от стенки; график функции $p(l/h, y/h)$ помимо смещения вдоль оси l/h при изменении y/h весьма вероятно, меняет форму.

Динамика развития, т.е. зарождения и затухания вихрей, представляется еще не ясной, но можно прежде всего подтвердить известную концепцию, согласно которой возмущения с наибольшими вихревыми напряжениями, обладающие вместе с тем наименьшими размерами, зарождаются вблизи стенки в области больших градиентов осредненной скорости. Далее можно отметить, что эти мельчайшие завихрения играют существенную роль в процессе диссипации как у стенки, так, по-видимому, и вдали от нее, куда они переносятся механизмом перемешивания, движущим завихренные массы жидкости в направлении от стенки. Перенос возмущений сопровождается общим увеличением их размеров, частичным распадением их и, вероятно, зарождением новых возмущений. Наряду с переносом от стенки в глубь потока малых возмущенных масс с большой вихревой напряженностью, в силу неразрывности возникает обратный перенос (в направлении к стенке) масс большего размера с менее значительной завихренностью, осуществляемый с меньшей поперечной вертикальной скоростью.

Крупномасштабные возмущения, несущие наибольшую энергию турбулентности и имеющие размер порядка глубины, представляют собой, по-видимому, сложный результат взаимодействия осредненного течения и возмущений, находящихся на различной стадии развития. Они определяют механизм перемешивания и, в частности, перенос взвешенных наносов и образуют наглядно-видимые упорядоченные формы (структурные образования, по М.А. Великанову).

При вычислении средних значений в спектрально-неоднородном турбулентном поле потребовалось бы ввести интегрирование по спектру; так, например, вычисляя среднее по спектру значение \tilde{E}_1 , мы имели бы в каждой точке

$$\tilde{E}_1 = \frac{\rho}{d} \sigma_v^3 \int_0^\infty \rho^{3/2}(\eta) f_1 \left(\eta, \frac{\mu}{\rho d \sigma_v}, \frac{\rho_{\pm}}{\rho} \right) d\eta. \quad (17)^5$$

При желании учесть различный характер спектра на разном расстоянии y от дна нужно ввести еще одно интегрирование по глубине, для выполнения которого необходимо знать не только функцию

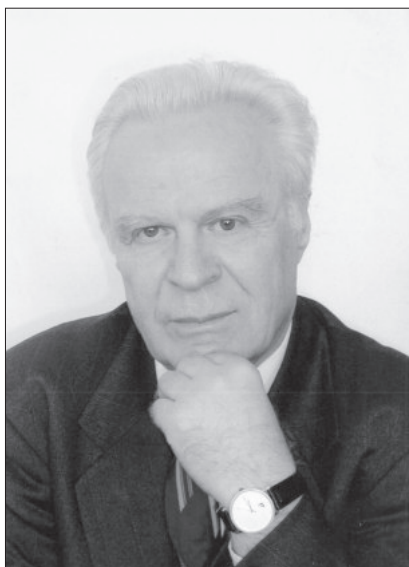
⁵ Здесь $\rho^{3/2}(\eta) d\eta = \sigma_v^3(\eta, \eta + \delta\eta) / \sigma_v^3$.

$p(\eta)$, но и более сложную функцию $p(\eta y/d)$. Воспользуемся пока представлением (17) только с тем, чтобы указать на одно важное обстоятельство, а именно: мелкомасштабные (высокочастотные) пульсации, связанные с наиболее значительными турбулентными ускорениями, должны отвечать наибольшим значениям функции f_1 и могут оказать весьма значительное влияние на интеграл в правой части (17). Это обстоятельство требует обратить особое внимание на роль мельчайших завихрений, если речь идет о детальной оценке поведения частиц взвеси и, в частности, о связанном с их присутствием диссипации энергии.

Отметим также, что в результате детального спектрального анализа поля турбулентных пульсаций в потоке, несущем наносы, можно рассчитывать на получение данных, которые позволят не только правильно осветить соотношения между интегральными величинами, непосредственно нужные для некоторых технических расчетов, но и построить теорию, основанную на дифференциальных уравнениях, отражающих все существенные особенности процесса. С этой точки зрения, представляется весьма желательным развитие тех детальных экспериментальных исследований, которые были организованы впервые в Советском Союзе по инициативе М.А. Великанова, являющегося одним из пионеров применения физических методов исследования в русловой гидрологии. Экспериментальные трудности не позволяют, однако, надеяться на завершение таких сложных исследований в сколько-нибудь короткий срок. Поэтому, наряду с этой работой, несомненно полезной для научного разрешения проблемы наносов, следует также вести на основе теории подобия упрощенное опытное изучение суммарных эффектов, устанавливая в первую очередь именно таким путем расчетные зависимости, необходимые для практики.

Хубларян Мартин Гайкович

(05.03.1935 – 27.07.2009)



Мартин Гайкович Хубларян – выдающийся учёный и организатор науки, внесший существенный вклад в развитие гидродинамики, гидрологии суши, гидрофизики, взаимодействия поверхностных и подземных вод; доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии наук; директор Института водных проблем АН СССР с 1988 г. по 2003 г.

М.Г. Хубларян родился 5 марта 1935 г. в селе Болнис-Хачен Грузинской ССР. В 1953 г. поступил на гидромелиоративный факультет Армянского сельскохозяйственного института, который окончил в 1958 г. После окончания института до 1960 г. работал инженером в институте «Ереванпроект», затем младшим научным сотрудником в Институте энергетики и гидравлики АН Армянской ССР. Именно к этому периоду относятся его первые научные работы, которые показали, что он – хороший теоретик: Мартин Гайкович сделал сложный расчет оптимального профиля шахтного водосброса при плотинах типа «маргаритка». В 1961 г. поступил в аспирантуру Института механики АН СССР по специальности «гидромеханика», которую окончил в 1964 г.; одновременно занимался на механико-математическом факультете МГУ. В 1964 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

С 1963 г. по 1968 г. М.Г. Хубларян работал в институте ВНИИГаз в должности старшего научного сотрудника. В 1968 г. утвержден в ученое звание старшего научного сотрудника по специальности «гидроаэромеханика и газовая динамика».

В 1968 г. М.Г. Хубларян был избран по конкурсу заведующим лабораторией математических методов Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (ВНИИГиМ), с 1974 г. по март 1976 г. руководил лабораторией прикладной гидродинамики, с апреля 1976 г. до декабря 1979 г. – заведующий лабораторией математического моделирования.

В 1975 г. Мартин Гайкович защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук на тему «Гидравлическая теория нестационарных напорных потоков и некоторые ее приложения». В ней нашли отражение исследования, проведенные во ВНИИГиМ по развитию гидравлической теории движения жидкости в напорных трубопроводах, их результаты до сих пор имеют широкое применение при проектировании и эксплуатации гидромелиоративных систем. В этот период он стал уделять большое внимание проблемам нелинейности и линеаризации уравнений гидродинамики, активно сотрудничал с академиком П.Я. Полубариновой-Кочиной.

Плодотворная научная деятельность М.Г. Хубларяна получила наибольшее развитие в период его работы в системе Академии наук. В декабре 1979 г. он был избран заместителем директора Института водных проблем АН СССР (ИВП АН СССР, с 1991 г. – ИВП РАН), одновременно возглавлял лабораторию моделирования гидрофизических процессов. В 1984 г. М.Г. Хубларян избран членом-корреспондентом АН СССР, в 1992 г. получил звание профессора.

В 1988 г. утвержден директором ИВП АН СССР, который возглавлял более 15 лет. Первые годы его деятельности в этой должности были трудным периодом в жизни коллектива, связанным с ролью Института как головной организации по научному обоснованию проблемы территориального перераспределения водных ресурсов. Эта проблема на протяжении многих лет находилась в центре внимания ученых и общественности, вызвала ожесточенные дискуссии, ей были посвящены многочисленные публикации, нередко в адрес Института высказывались голословные обвинения и необоснованная критика. Мартину Гайковичу удалось сохранить научный потенциал Института как одного из ведущих коллективов страны в области формирования, рационального использования и охраны водных ресурсов.

В 1994 г. М.Г. Хубларян избран действительным членом РАН. В 2003 г. освобожден от обязанностей директора Института по личной просьбе и назначен советником РАН.

Большая административная нагрузка отнимала много времени, но наука всегда оставалась в центре внимания Мартина Гайковича. Научные интересы М.Г. Хубларяна в эти годы связаны с исследованиями задач фильтрации в пористых средах, интрузии вод из водоемов в подземные горизонты водных потоков и их качества в средах с различными свойствами, гидрофизических закономерностей и особенностей водных потоков, разработкой концепции использования и охраны вод в различных регионах. В рамках решения этих проблем ему удалось создать или развить теорию формирования природных вод; изучить протекающие в них процессы; сформулировать физико-математические задачи, предложить методы их решения, разработать методические основы и принципы охраны вод. Под его руководством и непосредственном участии получен ряд новых важных результатов, в их числе можно отметить следующие.

В 1991 г. вышла в свет монография: Хубларян М.Г. Водные потоки: модели течений и качества вод суши, удостоенная в 1994 г. премии им. Ф.П. Саваренского за лучшие работы в области исследований вод суши.

По результатам конкурса лучших публикаций 2000 г. ему присуждена главная премия МАИК «Наука/Интерпериодика» за цикл работ «Антропогенное воздействие на водные ресурсы Севера и его экологические последствия (разработка теоретических основ определения критических антропогенных нагрузок)» (в соавторстве с Т.И. Моисеенко). Еще одна главная премия получена в 2007 г. за цикл статей, посвященных исследованиям нелинейных гидрофизических процессов в водных объектах.

В 2009 г. издана последняя книга, которая была практически подготовлена к изданию Мартином Гайковичем, но вышла в свет после его кончины: Хубларян М.Г. Водные потоки в различных средах / под ред. В.Н. Зырянова. 2009. – М.: ГЕОС, (Чебоксары). 485 с

Научные труды М.Г. Хубларяна широко известны в нашей стране и за рубежом, им опубликовано около 200 работ, в том числе 7 монографий.

Созданная М.Г. Хубляряном научная школа «Воды суши России – динамика и качество» завоевала широкое отечественное и международное признание и успешно развивается. Им подготовлено 2 доктора и 6 кандидатов и наук.

М.Г. Хублярян выполнял большую общественно-научную работу: член Бюро Отделения наук о Земле РАН, председатель Научного совета РАН «Водные ресурсы суши», председатель экспертной комиссии РАН по премии им. Ф.П. Саваренского, член НТС Минприроды РФ и Федерального агентства водных ресурсов, председатель Координационного комитета по Программе «Global International Waters Assessment in implementation of the UNEP-GIWA assessment program of the International Waters in Russia (2002-2004 гг.).

С 1995 по 2009 гг. – главный редактор журнала «Водные ресурсы», который издаётся на русском и английском языках и имеет высокий международный рейтинг.

Награждён тремя медалями (1985, 1996, 1997 гг.), Орденом Почета (1999 г.), Почетной грамотой Президиума РАН и Профсоюза работников РАН.

Мартин Гайкович был талантливым учёным и организатором науки; мудрым, благожелательным, замечательным человеком; образцом целеустремленности, мужества, стойкости, преданного служения науке.

В.Н. Зырянов (ИВП РАН)

Водные проблемы в XXI веке¹

М.Г. Хубларян

Вода как один из основных компонентов природной среды имеет решающее значение для обеспечения жизни на Земле. В зависимости от количества, качества и режима она создает благоприятные условия функционирования, сохранения и развития экосистемы и человечества на Земле и в то же время приносит большой ущерб экономике, вызывает гибель людей, уничтожает природные комплексы. Проблемы ресурсов и качества воды, ее определяющей роли для экономики и функционирования экосистем в XXI в. приобрели особую актуальность как в отдельных государствах, так и в мире в целом и широко обсуждались на Мировом водном форуме (март 2000 г., Гаага, Нидерланды) и Международной конференции «Пресная вода – XXI век» (Декабрь 2001 г., Бонн, Германия).

Ситуация в целом неблагоприятная. Дефицит водных ресурсов наблюдается во многих регионах, качество воды практически везде неудовлетворительное и требует улучшения. Возобновляемые водные ресурсы в мире оцениваются в 42700 км³/год, в России 4270 км³/год (10% суммарных водных ресурсов). В 2000 г. население мира достигло 6083 млрд чел., т. е. потенциальная водообеспеченность в среднем на одного человека составила 7,2 тыс. м³/год, при этом в Российской Федерации – около 30 тыс. м³/год (население России в 2000 г. – 146 млн чел.). Средняя водообеспеченность с 1970 по 2000 г. уменьшилась в 1,7 раза (с 12,9 до 7,2 тыс. м³/год), что связано с приростом населения на 2,4 млрд чел. В России прирост населения составил 15,3 млн чел., а водообеспеченность уменьшилась на 11,7%. В большинстве регионов мира речной сток крайне неравномерно распределен в течение года, большая его часть (60–70%) формируется в течение паводкового периода, доля меженного стока составляет всего 2–10% годового.

Суммарное водопотребление в современных условиях (1995 г.) в мире составляет 3750 км³/год, безвозвратное – 2280 км³/год. К 2025 г. прогнозируется увеличение суммарного водопотребления до

¹ Хубларян М.Г. Водные проблемы в XXI веке // В кн.: Хубларян М.Г. Водные потоки в различных средах. / Под ред. В.Н. Зырянова. 2009. – М.: ГЕОС, с. 464–471.

5200 км³/год [1]². Интенсивность роста водопотребления до 2025 г. существенно различается по странам и регионам. В развитых странах и в странах с ограниченными водными ресурсами увеличение водопотребления ожидается на 15–35%; в развивающихся странах, имеющих достаточные водные ресурсы, рост водопотребления может составить 100–200%. В настоящее время около 57% полного и 70% безвозвратного водопотребления в мире приходится на Азию, где расположены основные орошаемые земли. Суммарная площадь орошения в мире в 1995 г. составила 254 млн га; по данным прогноза, предполагается ее увеличение к 2010 г. – до 290 млн га, к 2025 г. – до 330 млн га. Наиболее интенсивный рост водопотребления в ближайшие десятилетия ожидается в Африке и Южной Америке (в 1,5–1,6 раза), наименьший – в Европе и Северной Америке (в 1,2 раза).

По данным Института мировых ресурсов, к середине XXI в. более чем 1/5 часть населения планеты будет жить в условиях засухи; 2,43 млрд чел. как минимум в 40 странах будут страдать от недостатка воды. Около 1,5 млрд чел. относятся к категории абсолютно бедных, что составляет почти 1/4 населения мира. Для достижения хотя бы среднего уровня требуется резко увеличить добычу сырья, производство энергии и изъятие свежей воды из водоисточников, что создаст дополнительную нагрузку на природную среду, ухудшит экологическую ситуацию на Земле.

Приведенные выше прогнозные оценки выполнены для наиболее вероятного сценария развития мировой экономики и относятся к средним климатическим условиям без учета возможных антропогенных изменений глобального климата. В периоды потепления климата и увеличения контрастности температур между океаном и континентами, между северными и южными широтами наблюдалась интенсификация циркуляционных процессов в атмосфере с возрастанием в северном полушарии переноса с запада на восток. Это вызвало увеличение количества глубоких циклонов над Европой на 50%, что привело к росту облачности и атмосферных осадков, соответственно возрос речной сток.

² По данным экспертов ООН, ранее суммарное водопотребление прогнозировалось к 2001 г. до 5200 км³/год, а к 2020 г. – до 7-11 тыс. км³/год. Как следует из этих данных, прогноз не оправдался.

Увеличение количества тропических циклонов на 30% наблюдается на востоке северной части Тихого океана. Потепление климата привело к интенсификации процессов водообмена. Испарение с океанической поверхности возросло приблизительно на 4%, увеличение осадков в среднем составило около 3–4%. С развитием потепления и активизацией таяния ледников все больше воды попадает в Мировой океан. За период с 1860 до 1996 г. повышение уровня Мирового океана составило около 20 см, из них 10% – за счет теплового расширения морской воды.

Явление Эль-Ниньо также влияет на земную атмосферу, вызывая крупные аномалии погоды во многих районах. Глобальное потепление климата за счет эмиссии парниковых газов вызывает изменение всего комплекса гидрометеорологических факторов, определяющих формирование водных ресурсов. Существует целый ряд различных климатических, математических моделей для прогнозирования влияния изменения CO_2 на климат. К сожалению, такие оценки весьма противоречивы. Потепление приведет к увеличению атмосферных осадков, уменьшению снегового покрова и продолжительности морозного периода. В обзорном отчете для Межправительственной комиссии по изменениям климата 2001 г. делается вывод о том, что в ближайшем будущем климат (а следовательно, и полные ресурсы) будет существенно меняться вследствие антропогенных выбросов [2]. Однако существуют и другие мнения. В частности, «альтернативные экологи» (США) утверждают, что данные науки опровергают существование парникового кризиса. Уместно отметить и приведенный в отчете по изменениям климата 2001 г. факт, что глобальные изменения температуры за последние 100 лет не подтверждаются природой антропогенного фактора. Эта мысль в отчете обоснована следующими данными. В XX в. основная часть (0,53 °C) общего роста (0,6 °C) глобальной температуры пришлось на первую половину (1910–45 гг.), когда антропогенное повышение концентрации парниковых газов было небольшое. Есть надежда, что в XXI в. может быть дан убедительный, научно обоснованный ответ на природу изменения климата.

Основными причинами резкого увеличения содержания углекислого газа являются промышленность и автомобильный транспорт. Современное глобальное потепление связано также и с други-

ми естественными факторами: солнечные циклы, уровень содержания в атмосфере озона, вулканическая пыль, выбросы в атмосферу огромного количества метана из-за разложения органических веществ в болотах, выбросы из газовых месторождений и из поврежденных газопроводов.

Все элементы гидрологического цикла будут изменяться под воздействием изменения климата. Процесс потепления развивается преимущественно в холодный период года, теплый же период может становиться более прохладным и влажным. Однако это наблюдается не везде. С повышением температуры воздуха в одних регионах происходит похолодание в других (Израиль, Турция, Испания, Италии). Эти аномалии ученые. Связывают также с потеплением. По их мнению, таяние ледников Антарктиды и попадание холодной пресной воды в океан привело к охлаждению вод Гольфстрима на 20%.

С помощью гидрологических моделей было проанализировано воздействие изменений климата на различные водосборные бассейны от семиаридных до гумидных. Потепление на $0,5^{\circ}\text{C}$ приведет к увеличению осадков на большей части Западной и Северной Европы, на Украине, в Центральной Сибири и понижению осадков на большей части Центральной и Восточной Европы, в ряде областей Западной Сибири и Казахстана. Потепление вызовет засуху в Поволжье, гибель сибирских таежных лесов и таяние вечной мерзлоты. Исследования показали, что в бассейне р. Волги, в частности, при потеплении на $1-1,5^{\circ}\text{C}$ ожидается сокращение осадков на 10–15 мм, рост испаряемости на 40–50 мм и уменьшение речного стока на 28–30 мм, при потеплении на $2-2,5^{\circ}\text{C}$ можно ожидать увеличения осадков на 50–60 мм, рост испаряемости на 70–80 мм и сокращение стока на 10–12 мм.

Таких примеров можно привести много, но к этим данным следует относиться с осторожностью как к модельным примерам, поскольку ни одна модель не в состоянии учитывать все факторы гидрологического цикла и антропогенного воздействия в глобальном и особенно в региональном масштабе. Приведенные выше результаты требуют дальнейшего уточнения путем созданий современных моделей и их проверки натурными данными. Нужны новые подходы к созданию математических моделей гидрологического

цикла и их обобщению для различных пространственно-временных масштабов с учетом влияния изменений климата и хозяйственной деятельности, которые позволят описывать основные процессы формирования водных ресурсов и их режима.

К числу наиболее сложных проблем, угрожающих человечеству, следует отнести наводнения. Катастрофические наводнения известны с глубокой древности, достаточно вспомнить о Всемирном потопе. Причины наводнений связаны с метеорологическими факторами: экстремальные половодья и паводки, заторные и зажорные явления, штормовые нагоны, подводные землетрясения и извержения подводных вулканов, цунами и др. Независимо от природы наводнений ущерб, ежегодно наносимый мировой экономике этим стихийным бедствием, исчисляется сотнями миллиардов долларов. Только за последние годы он составил более 200 млрд долл. Помимо огромного материального ущерба катастрофические наводнения приводят к гибели десятков тысяч и страданиям десятков миллионов людей. Пострадали от наводнений в мире: 1990–94 гг. – 131,5 млн чел.; 1995–99 гг. – 168,5 млн чел. Экономические потери от наводнений в мире: 1990–94 гг. – 43,9 млрд долл/год; 1995–99 гг. – 21,5 млрд долл/год. Наводнение 1931 г. на р. Янцзы в Китае унесло 1,3 млн чел.; во время наводнения в Бангладеш в 1970 г. погибло более 500 тыс. чел. и осталось без крова 28 млн чел.

Во многих странах мира, в первую очередь в Индии, Китае, США, наводнения часто носят характер национальных бедствий. Достаточно вспомнить наводнение 1979 г. в Индии, когда было разрушено 1026 деревень, погибло около 107 тыс. голов рогатого скота, уничтожены посевы сельскохозяйственных культур на площади 55867 га; от наводнения 1982 г. в долине р. Ганга пострадали около 20 млн чел. Число человеческих жертв насчитывается тысячами. За 290 лет, в течение которых ведутся наблюдения над уровнем р. Невы (С.-Петербург), свыше 300 раз она выходила из своих берегов. Самые большие по величине наводнения были в 1777, 1824, 1924, 1955 и 1975 гг. Для защиты С.-Петербурга от нагонных наводнений в Невской губе еще 15 лет назад началось строительство дамбы, в настоящее время оно пока остановлено. Можно привести и ряд других примеров. За 1991–99 гг. на р. Янцзы произошло пять катастрофических наводнений, количество пострадавших в каждом случае превышало 200 млн чел.

В 2001 г. в результате экстремального наводнения на реках Лене и Оби были затоплены города Ленск, Якутск, Барнаул. Только в бассейне р. Лены пострадали более 30 тыс. чел., ущерб по разным оценкам составил 2,4–4 млрд руб. (80–133 млн дол.). Отметим также наводнение в бассейне р. Кубани, которое произошло в январе с. г. (ущерб около 2 млрд руб.). В 2001 г. ущерб от наводнений в России достиг около 10 млрд руб. Следует подчеркнуть, что в Российской Федерации ущерб от наводнений превосходит все остальные его виды.

Среди природных катастроф наибольший экономический ущерб наносят наводнения, составляющие 32% числа бедствий. Анализ наводнений в XX в. показал, что во всем мире наблюдается тенденция значительного роста ущерба от них [3]. Например, в начале XX столетия среднегодовой ущерб от наводнений в США оценивался в 100 млн, в середине столетия – около 1 млрд, а в последние годы более 10 млрд долл. Причиной этого является хозяйственная деятельность в долинах рек, освоение паводкоопасных территорий и изменение климата. Некоторые другие примеры можно найти на сайте Дармутской обсерватории при Ганноверском колледже в США и Научном центре по эпидемиологическим катастрофам (CRED), Брюссель.

К сожалению, пока не существует научно обоснованных методов прогнозирования наводнений. Они носят случайный характер, некоторые имеют редкую повторяемость (один раз в 200–300 лет и более). Циклы многоводных и маловодных лет не имеют строго выраженных закономерностей. Продолжительность циклов различной водности составляет от 2 до 8, реже до 20 лет. Гидрологические расчеты и прогнозы затруднены из-за вековых колебаний климата, его изменений под влиянием антропогенных факторов и других причин. Они тесно связаны с прогнозом погоды.

Несколько слов о селевых потоках. Этому явлению подвержены многие горные и предгорные районы земного шара. В бывшем СССР более 25% территории горных и предгорных районов находилась под ударом селя. Следует отметить, что здесь также не существует достоверных методов прогнозирования этого коварного и грозного процесса. На практике селезащита осуществляется с помощью гидротехнических сооружений (плотины, селеуловители, селехрани-

лица, укрепление берега, расчленение русла реки и др.). В частности, эти мероприятия позволили защитить г. Алматы (Казахстан) от жертв и разрушений, когда в июле 1973 г. селевой ноток объемом 1,5 млн м³ мчался со скоростью более 10 м/с. Для наводнений и селеопасности велика роль системы мониторинга. В противопоаводковой защите большое значение имеет программа страхования от наводнений.

В некоторых международных речных бассейнах не налажено тесное сотрудничество между прибрежными государствами, споры и конфликты не позволяют оптимально использовать и осуществлять совместное управление водными ресурсами бассейна, сохранять или улучшать качество воды, приостанавливать деградацию экосистем. Природа загрязнения водной среды, в том числе путем трансграничного переноса загрязненных воздушных масс, такова, что требуются согласованные действия и кооперация стран мира для бережного отношения и сохранения водных ресурсов.

В системе использования, охраны и управления водными ресурсами основой должен стать бассейновый принцип. Это относится ко многим трансграничным рекам, например, р. Амазонке, в бассейне которой расположены семь стран, р. Дунай – 17 стран и др. Аналогичные проблемы актуальны и для России. Распад Советского Союза привел к обострению и без того напряженной обстановки в ряде регионов, особенно в бассейнах Каспийского и Аральского морей.

Проблемы Каспия заслуживают особого внимания. Им посвящено множество публикаций, предпринимаются конкретные шаги на правительственном уровне. Создание в бассейне моря в последние годы независимых государств, отсутствие соглашения по статусу моря между прикаспийскими странами, флюктуации уровня Каспия, хищнический вылов ценных осетровых рыб, масштабы добычи нефти и газа в акватории и их транспортировка – все это еще более усложнило ситуацию в регионе, которая в будущем может обостриться.

В результате подъема уровня Каспийского моря на 2,5 м до отметки минус 26,66 м с 1978 по 1995 г. были затоплены сотни тысяч га псиных земель, усилились нагонные явления, ухудшились условия жизни населения; ущерб составил более 6 млрд дол. В послед-

ние 6 лет уровень моря понизился на 60 см. Воды Каспийского моря характеризуются как загрязненные, содержание нефтепродуктов достигает 3 ПДК и более, фенолов – 5 ПДК [4]. Комплексное использование ресурсов моря требует межгосударственного соглашения прикаспийских стран для управления уникальным природно-ресурсным потенциалом бассейна, создания механизма природно-хозяйственного страхования.

В регионах с дефицитом водных ресурсов практикуется опреснение минерализованных вод для улучшения водообеспечения. Опреснительные установки разных конструкций особенно распространены в Саудовской Аравии, Объединенных Арабских Эмиратах, Кувейте, а также в США, Японии, Иране, бывшем СССР. При этом их суммарное производство не превышает 10 км³/год (менее 0,3% общего объема водопотребления).

Весьма остро стоит проблема загрязнения поверхностных вод. Среди европейских рек следует отметить р. Вислу в Польше, которая практически считается непригодной даже для промышленного использования. Не лучше была ситуация на р. Дунае. Положительным примером решения проблемы является бассейн р. Рейна, где благодаря усилиям нескольких стран достигнуто коренное улучшение состояния речных вод. Загрязненность водных ресурсов Азии также превышает мировой уровень, особенно в странах Юго-Западной Азии, Индии, Китае.

В США достигнуты значительные успехи по предупреждению загрязнения и улучшению качества воды, наиболее ощутимые в районе Великих озер. Одним из основных источников загрязнения поверхностных вод на западе США является сток с сельскохозяйственных угодий, на востоке – промышленность. По данным Европейской комиссии ЕС, воды озер и рек Европы считаются чистыми (94%), в то время как 8 лет назад – менее половины. В Южной Америке на качество вод оказывают влияние сельскохозяйственное использование земель, применение удобрений и пестицидов, рост городского населения, промышленности и практически полное отсутствие очистных сооружений. Отсутствие очистных сооружений в большинстве стран Африки и дефицит водных ресурсов в странах Северной Африки обуславливают неблагоприятное положение с качеством воды. Загрязненность поверхностных вод Австралии и

Океании в целом невелика. Вопросы качества воды актуальны лишь в юго-восточных штатах Австралии.

Водные ресурсы России составляют более 20% мировых запасов пресных поверхностных и подземных вод. Среднегодовые ресурсы речного стока России оцениваются 4,27 тыс. км³/год. В озерах сосредоточено 26,5 тыс. км³ пресных вод, в том числе в оз. Байкал – 23 тыс. км³. Эксплуатационные запасы подземных вод составляет 30,4 км³/год (по прогнозным оценкам – 323,4 км³/год); в настоящее время используется 11–13 км³/год. Забор воды из водных объектов постоянно снижается, в 1985 г. он составил 117,3 км³, в 2001 – 87,4 км³. В экономике страны в 2000 г. было использовано всего 214,6 км³ воды, из них 87,4 км³ – в оборотных и 127,2 км³ – в повторно-последовательных системах водоснабжения.

Как следует из приведенных данных, из водных объектов забирается около 2% воды. В то же время в отдельных речных бассейнах не обеспечиваются требования водопользователей – рыбном хозяйстве, водном транспорте, гидроэнергетике. Практически все водные объекты не соответствуют по качеству воды нормативным требованиям для водоемов рыбохозяйственного назначения. Некоторые водные объекты (12%) по качеству воды не пригодны для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения (реки Нева, Томь, Ока, Урал). Потребление населением некачественной питьевой воды вызывает различные заболевания, особенно кишечные инфекционные.

Единый подход к проблеме охраны речных вод, водоемов, подземных вод и морей в настоящее время нереален. Имеется ряд естественных (географических, климатических) и антропогенных факторов, которые необходимо учитывать в каждом конкретном случае. Требуется создать общую теорию формирования качества вод, которая охватила бы физико-механические, химические и биологические процессы.

В Российской Федерации разработаны долгосрочные сценарии развития водной системы страны на период с 2000 по 2025 г., в том числе первый период – до 2016 г., второй – до 2025 г. Рассмотрены три возможных варианта сценариев (условных): обычный мир; кризис воды; устойчивое развитие.

Начиная с 1980-х гг. происходит снижение темпов роста населения. В 2000 г. численность населения России составила 146 млн чел.,

в 1980 г. – 139,2 млн чел., в 1990 г. – 48 млн чел., в 2010 г. – 141,6 млн чел. (прогнозная оценка). Общий объем водопотребления будет увеличиваться за счет экономического роста. В некоторых регионах с напряженным водным балансом обострятся противоречия между основными потребителями. Так, в Каспийском бассейне это противоречие между отраслями сельского и рыбного хозяйства, нефтеперерабатывающей промышленности и транспорта. Эти проблемы усугубляются нерешенностью вопроса между прикаспийскими государствами о статусе моря и порядке использования минерально-сырьевых и биологических ресурсов. В бассейнах рек Дона и Кубани имеются противоречия между промышленностью, сельским хозяйством и жилищно-коммунальным комплексом.

Таким образом, в ряде регионов до 2010 г. сохранятся серьезные проблемы в водном хозяйстве. В дальнейшем с ростом экономики России в целом ситуации будет улучшаться и в водном секторе, но в ряде регионов острота проблем нарастает.

Остановимся на сценарии устойчивого развития водной системы страны. В этом случае предполагается: переход на новые экологически чистые технологии в промышленности и сельском хозяйстве, снижение потребления воды на единицу продукции; снижение уровня загрязнения речных и подземных вод; обеспечение населения питьевой водой требуемого качества, восстановление экологического баланса в бассейнах рек; улучшение распределения водных ресурсов между основными пользователями; обеспечение защиты населения от наводнений и других стихийных бедствий.

Что касается сценария устойчивого развития водной системы в мире в целом, то к 2025 г. население увеличится до 8 млрд чел. (в том числе 6,6 млрд чел. в развивающихся странах; 0,4 млрд чел. – в странах с переходной экономикой и около 1 млрд чел. – в промышленно развитых странах). Стабилизации роста населения можно ожидать к 2070 г. В водном секторе обозначены следующие ориентиры к 2015 г.: каждый человек должен иметь не менее 25 л/сут качественной питьевой воды; будут внедрены новые технологии; будут приняты Хартия Воды и Конвенция Воды всеми государствами как основа для управления водными ресурсами. Во второй половине прогнозного периода предполагается существенное снижение темпов роста численности населения во многих странах; заметное

улучшение качества окружающей среды (однако еще не все экосистемы будут восстановлены); забор воды сократится до уровня, обеспечивающего устойчивое развитие водной и экосистемы.

Согласно программе «World Water Vision», для достижения намеченных целей в области использования воды в 2025 г. потребуются ежегодные инвестиции в размере 180 млрд долл. (в 2000 г. – 70–80 млрд долл.). Программой предусмотрен комплекс мер, направленный на улучшение ситуации в развивающихся странах. При их выполнении в этих странах к 2025 г. удовлетворится потребность населения в воде.

Если бы период 1980-1990 гг., объявленный ранее ООН Международным десятилетием пищевого водоснабжения и санитарии, был реализован, то к 1990 г. все население Земли было бы обеспечено чистой водой. Надеемся, что на этот раз прогнозы станут действительностью. Время покажет!

ЛИТЕРАТУРА

1. Шикломанов И. А. Мировые водные ресурсы и использование вод: современная оценка и прогноз на начало XXI века // Великие реки – 99: Тез. докл. Международ. конф. по проблемам экологической оздоровления великих рек мира. Т. 1. – Нижний Новгород, 1999.
2. Climate Change 2001: The Scientific Basis. International panel on climate change.
3. Авакян А. Б., Истомина М. Н. Наводнения в мире в последние годы XX в. // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. №5.
4. Хубларян М. Г. Колебание уровня Каспийского моря и его эколого-экономические последствия // Тез. докладов Междунар. науч. семинара. – М., 2000.

Эйно́р Леона́рд О́льгердо́вич

(02.04. 1932 – 22.05. 1995)

Леонард Ольгердович Эйно́р – известный учёный, выдающийся специалист в области биохимии, формирования гидрохимического режима водных объектов, процессов самоочищения водоёмов, методов изучения роли высшей водной растительности в формировании качества вод, доктор биологических наук.

Л.О. Эйно́р родился 2 апреля 1932 г. в г. Ленинграде, в семье крупного геолога Ольгерда Леонардовича Эйно́ра – автора широко известного двухтомного учебника для ВУЗов «Основы геологии СССР».

Детство и юность Л.О. Эйно́р провел в г. Ленинграде, где поступил на биолого-почвенный факультет Ленинградского государственного университета, специализируясь по кафедре физиологии и биохимии растений.

После окончания университета Леонард Ольгердович начал работать в Институте ботаники АН УССР имени Н.Г. Холодного, где занимался изучением первичных механизмов фотосинтеза. Этой теме была его посвящена его кандидатская диссертация, а в 1973 г. в издательстве «Наукова думка» опубликована монография «Реконструирование энергетических механизмов фотосинтеза». Одновременно с этим, вышла в свет (на украинском языке) совместная с директором Института ботаники К.М. Сытником научно-популярная книга Ситник К.М., Эйно́р Л.О. «Життя зеленого».

В середине 1973 г. Л.О. Эйно́р по семейным обстоятельствам переезжает в Москву. Он работает в Госкомитете по науке и технике СССР, а с 1977 года – в Институте водных проблем АН СССР в должности старшего, а затем и ведущего научного сотрудника.



Основным направлением исследований, проводимых Л.О. Эйнором в ИВП АН СССР, стало изучение роли высшей водной растительности в формировании качества воды в водоемах. Л.О. Эйнором отстаивал концепцию, согласно которой биоценоз прибрежной высшей водной растительности благотворно влияет на качество воды в водоеме, обеспечивая, с одной стороны, процессы самоочищения водоёма, а, с другой, препятствуя массовому развитию планктонных водорослей. Его работы посвящены следующим научным направлениям:

- сравнение качества воды в сходных водоемах, отличающихся степенью зарастания высшей водной растительностью;
- экспериментальное изучение динамики поглощения высшими водными растениями солей азота и фосфора с дна и из толщи воды;
- экспериментальное изучение особенностей протекания некоторых физиологических процессов у высших растений при разном уровне загрязнения воды;
- сбор данных о приуроченности разных видов высших водных растений к водоемам с разной степенью загрязненности;
- разработка конструкции инженерных устройств, позволяющих использовать высшие водные растения для очистки сточных вод.

Л.О. Эйнором и его коллеги проводили как лабораторные, так и полевые работы на базе Ивановской научно-исследовательской станции Института, расположенной на берегу р. Волги у г. Конаково, а также на других водных объектах Московской области.

Исследования Л.О. Эйнора подтвердили известные ранее данные о благотворном влиянии зарослей высшей водной растительности на качество воды в водоёмах, а также позволили предложить ряд практических рекомендаций по улучшению качества вод. В частности, рекомендовалось создание «ботанических площадок» (в настоящее время предпочитают термин «гидрботанические площадки» – ГБП), через которые пропускаются сточные воды, стекающие в водоемы. В результате исследования различных водоёмов было установлено, что некоторые виды, в частности широколистный и узколистный Рогозы (*Typha latifolia* L. и *Typha angustifolia* L.) способны расти при очень высоких концентрациях загрязняющих веществ и поэтому могут высаживаться у основания ботанических площадок.

Л.О. Эйно́р предложил примерную схему распределения видов растений вдоль профиля ботанической площадки в соответствии с их способностью расти в среде разной степени загрязненности.

Результаты работ в области изучения влияния высшей водной растительности на процессы самоочищения водоемов были обобщены им в докторской диссертации, которую Л.О. Эйно́р защитил в 1989 г. в МГУ им. М.В. Ломоносова, а также в опубликованной в 1992 г. монографии «Макрофиты в экологии водоёма».

Л.О. Эйно́р обладал инженерным складом мышления и неоднократно предлагал интересные проекты. Одним из таких проектов был альтернативный вариант защиты г. Ленинград от наводнений. Построенная дамба стимулировала процесс эвтрофирования нижнего течения р. Невы и ухудшения качества воды. Л.О. Эйно́р предложил вместо сплошной дамбы построить несколько рядов высоких стреловидных сооружений с вершинами, обращенными вверх по течению. Такая конструкция позволяла неврской воде беспрепятственно уходить в Финский залив, но из-за образующихся водоворотов перекрывала обратный ход воды.

В 1989 г. Л.О. Эйно́р был назначен заведующим лабораторией водных экосистем ИВП АН СССР и существенно расширил круг выполняемых работ. В задачи лаборатории входили исследования экосистем сильно засоленных водоемов, экологической токсикологии, возможностей экологического нормирования содержания загрязняющих веществ в водоемах и т.д.

Л.О. Эйно́р был хорошим популяризатором науки, он умел четко и доступно излагать суть своих работ.

Леонард Ольгердович – настоящий ученый, скромный, интеллигентный, благожелательный человек. К сожалению, он скончался в мае 1995 г. после продолжительной и тяжелой болезни, не успев полностью реализовать свои творческие планы. Тематика, которой он увлеченно занимался многие годы жизни, продолжена его учениками и активно развивается в нашей стране и за рубежом.

С.В. Багоцкий

В.А. Вавилин (ИВП РАН)

Ботаническая площадка – биоинженерное сооружение для доочистки сточных вод¹

Л.О. Эйно́р

Рассматривается вопрос о ботанической площадке как биоинженерном сооружении, на котором происходит деструкция загрязняющих веществ в двух горизонтах: верхнем аэробном – в зоне корнеобитания макрофитов и аэробных микроорганизмов и нижнем анаэробном – в зоне анаэробных микроорганизмов, осуществляющих глубокую деструкцию органических веществ.

Качество воды определяет ее биологическую полноценность, которая активно формируется при участии гидробионтов. В условиях постоянно растущего антропогенного пресса на среду обитания вода превратилась в важнейший дефицитный продукт для человека. Вопрос о путях восстановления ее биологической полноценности актуален для всех стран. Однако возможности использования и управления процессами естественного самоочищения водоемов раскрыты пока не полностью. В первую очередь это объясняется их недостаточной изученностью.

Поэтому необходимо опираться на познание природных процессов самоочищения водной среды, которые протекают в речных и озерных экосистемах.

Эффект самоочищения воды в реках, по А. В. Францеву [18, 19], достигается благодаря наличию и чередованию перекатов с быстрым течением воды, ее хорошим перемешиванием и аэрацией, заросших макрофитами широких плесов с замедленным течением и песчаными пляжами, где под действием набегающей волны песок находится в движении и хорошо профильтровывает воду, и, кроме того, глубоких омутов, играющих роль естественных отстойников.

От изучения естественных процессов самоочищения А. В. Францев предлагал перейти к направленному управлению процессами самоочищения, в частности высаживать на водохранилищах высшие водные растения (типа водяного риса) и управлять их развитием, тем самым искусственно создавая биоплато, использовать их фильтрующую и окислительную способность, очищать воду с их помощью и бороться с евтрофированием, часто приводящим к «цвете-

¹ Эйно́р Л.О. Ботаническая площадка – биоинженерное сооружение для доочистки сточных вод. Водные ресурсы №4, 1990 стр. 149-161

нию» воды, т. е. чрезмерному развитию водорослей. Эти идеи были быстро подхвачены за рубежом, где особенно успешными оказались опыты с камышом, проводимые К Зайдель по созданию биоплато на притоке Рейна [29].

От создания биоплато с макрофитами внутри водных объектов (особенно в каналах [12, 13] и водохранилищах [1, 14], т. е. в искусственных водных сооружениях, где продукционно-деструкционные процессы плохо сбалансированы по сравнению с возникшими тысячелетия назад реками и озерами, в которых процессы метаболизма оказались хорошо «отлаженными») стратегия борьбы за сохранение качества воды переносится на водосборную площадь. Активная хозяйственная деятельность человека на практике приводит к более или менее значительному нарушению нормативов качества сбрасываемой воды. Наблюдения показывают, что если на пути недоочищенных сточных вод к водным объектам находится болотце или заросшая макрофитами протока, то качество воды после них заметно улучшается [2, 7, 9–11, 16, 21, 23, 28, 32].

Под ботаническими площадками автор понимает широкий спектр водотоков, заросших макрофитами естественным путем или высаженных в них искусственно. Как правило, это болотистые участки с замедленными скоростями течения воды на пути к более крупным водным объектам. Никакого ухода за ботаническими площадками обычно не ведется, все процессы частичной доочистки происходят естественно, без вмешательства человека. Для таких заболоченных участков характерно расширение потока с более или менее резким замедлением скорости движения воды. При уходе за такой ботанической площадкой в конце вегетации убирают избыток биомассы водной растительности, проводят обвалование берегов и частичную расчистку ложа от иловых отложений. Фитомасса представляет интерес для силосования и других хозяйственных нужд [8].

Таким образом, от естественных зарослей болотной растительности с большей или меньшей проточностью ботанические площадки отличаются вмешательством человека в естественно развивающиеся процессы метаболизма попаданием хозяйственно-бытовых стоков, спуском в них вод, различающихся по степени загрязненности.

Иногда сточные воды сбрасывают непосредственно в естественные болота. Поскольку последние не обладают проточностью, их едва ли можно отнести к ботаническим площадкам, хотя в них протекают естественные процессы очистки от различных загрязняющих веществ и соединений биогенных элементов. Исследованиями в аридных зонах США установлено, что в естественных болотах, куда сбрасывают сточные воды, последние наряду с азотом теряют также и фосфаты, которые в кислой среде адсорбируются и превращаются в нерастворимые комплексы с алюминием и железом, а в щелочной среде трансформируются в апатитоподобные формы кальций-фосфата.

Широкий спектр водоохраных объектов на водосборе, объединяемых общим термином «ботаническая площадка», требует рассмотрения как происходящих в них качественных процессов изменения параметров воды, так и получения количественных характеристик, которые позволили бы планировать размещение ботанических площадок там, где это необходимо и создавать их с максимальной эффективностью круглогодичного функционирования.

Необходимо учитывать, что животноводческие комплексы, птицефабрики и особенно свинофермы сбрасывают воду, загрязненную возбудителями кишечных инфекций (сальмонеллами, шигеллами, энтеро-вирусами, вибрионами и др.), а также разнообразными органическими веществами, которые могут способствовать более длительному сохранению в воде патогенных микроорганизмов и повышать потенциальную опасность заражения человека при различных видах водопользования. Нефтепродукты, моющие средства, минеральные удобрения в различных комбинациях могут сохранять и даже развивать как индикаторную, так и патогенную микрофлору. В условиях промышленно-бытового и сельскохозяйственного загрязнения это создает эпидемическую опасность для водных объектов [17].

С целью изучения возможности использования макрофитов и биоценозов на их основе для улучшения качества воды, сбрасываемой в водоемы после очистных сооружений и полей фильтрации, в течение ряда лет проводились наблюдения за протоками, соединяющими поля фильтрации (карты) с водотоками Иваньковского водохранилища. Одним из объектов исследований была Завидов-

кая птицефабрика в Калининской обл. производительностью 1,5 млн голов птицы в год. Сброс вод с полей фильтрации после очистных сооружений составляет здесь ~2000 м³/сут, он происходит неравномерно, расходы на выходе колеблются в пределах 36–80 л/с.

Соединительная протока, собиравшая воды с полей фильтрации, имеет площадь 16 га и длину до р. Дойбица 0,7 км; на протяжении 0,4 км она расширялась в виде понижающегося заболоченного участка (площадь 1,7 га), обильно заросшего макрофитами, с резким замедлением скорости движения воды. Сверху вниз на нем, трижды последовательно сменяя друг друга, но не смешиваясь, на пути недоочищенных сточных вод ежегодно развивались густыми плотными зарослями рогоз и тростник. Заросли заканчивались на расстоянии 150 м от впадения протоки в р. Дойбица в зоне подпора Ивановского водохранилища, где распластаный поток собирался в узкую канаву с быстрым течением. Общая фитомасса рогоза и тростника достигала на болотистом участке 40 т.

В течение 20 лет существования очистных сооружений и образования естественным путем этой ботанической площадки никакого ухода за ней не проводилось, дно было покрыто слоем черных илистых отложений, растения после сезона вегетации здесь же перегнивали. Однако ниже этого участка до реки дно было каменистым и хорошо промытым.

Наблюдения в течение трех лет за качеством воды вдоль всей протоки показали, что, несмотря на полное отсутствие ухода за протокой, состояние водной среды, определяемое такими параметрами, как насыщение кислородом, БПК₅, органолептические и санитарно-бактериологические показатели, окисляемость в процессе прохождения жидкости через эту ботаническую площадку, значительно улучшается. Однако изменения по многим другим параметрам незначительны. Это видно из сравнения первых двух столбцов таблицы.

Таким образом, образовавшаяся естественным путем ботаническая площадка сыграла весьма положительную роль в защите акватории Ивановского водохранилища от загрязнения стоками Завидовской птицефабрики. Биомасса же фитопланктона на участке слишком мала для того, чтобы фитопланктон в составе биоценоза ботанической площадки мог бы сыграть водоохранную роль.

Таблица 1

**Влияние заросшего макрофитами болотистого участка протоки
Завидовской птицефабрики на гидрологические, гидрохимические
и санитарно-бактериологические показатели качества воды в период
вегетации рогаза и тростника и после обвалования участка**

Показатель	В период существования болотистого участка		После обвалования участка и создания прямооточной канавы	
	на входе	на выходе	на входе	на выходе
Число определений	9		8	
Время пребывания жидкости на участке	10–20 ч		25 мин	
Биомасса макрофитов, т	40		0,01	
О ₂ , % насыщения	10±7	95±5	15±10	254±10
БПК ₆ , мг О/л	150±50	5±3	150±50	150±50
Удельная электропроводность, мк См/см	847±50	997±50	920±70	930±60
РН	7,40–7,82	7,89–8,55	7,76–8,00	7,80–8,20
Цветность, град	45±10	45±20	47±5	50±5
Прозрачность, запах	Мутная жидкость с неприятным запахом	Прозрачная жидкость без запаха	На входе и выходе мутная жидкость с неприятным запахом	
Перманганатная окисляемость, мг О/л	45±15	14±8	33±6	35±6
Хлор-ион, мг/л	2054±30	210±30	190±30	190±30
Сульфат-ион, мг/л	36	33	40±10	40±10
Бикарбонат-ион, мг/л	560±50	545±50	550±50	550±50
Кальций-ион, мг/л	62±4	59±4	65±5	73±7
Магний-ион, мг/л	38±4	37±4	37±4	36±4
Аммоний-ион, мг/л	11,0±3,0	9,0±3,0	16,0±2,0	16,1±2,0
Нитрит-ион, мг/л	0,01–0,015	0,15–0,05	0,02–0,05	0,02–0,05
Нитрат-ион, мг/л	0,1±0,05	0,854±0,4	0,25±0,05	0,025±0,05
Фосфат-ион, мг/л	3,00±0,45	2,50±0,5	3,3±1,0	3,4±1,0
Фосфор валовый, мг/л	4,5±1,2	3,8±1,1	3,8±1,0	3,9±1,0
Колииндекс	≥31000	500–2100		
Патогенная микрофлора	Обнаружена	Не обнаружена	Обнаружена	
Водоросли				
диатомовые	40/0,01	»		
синезеленые	300/3,30	»		
зеленые	160/0,04	»		
эвгленовые	1360/7,91	8/0,24		
пирофитовые	Не обнаружено	4/0,25		

Примечание. Определения санитарно-бактериологических показателей выполнены под руководством В. К. Бойченко, а фитопланктона — Л. В. Тарасенко
В числителе — тыс. кл/л, в знаменателе — мг/л

Анализ минерального состава рогоза и тростника выявил более высокую концентрацию N и P в растениях, собранных с вышерасположенных участков, вдоль потока доочищаемой на ботанической площадке жидкости. Так, в растениях рогоза содержание N снижается с 12,76 до 9,63 мг/г сух. веса, P – с 2,23 до 2,17 мг/г, а в растениях тростника N – с 16,95 до 15,48 мг/г и P – с 1,34 до 1,18 мг/г сух. веса. В то же время расчеты показывают, что из-за отсутствия работ по удалению иловых отложений и биомасс растений на ботанической площадке величины извлечения из доочищаемой жидкости N и P невелики. Полученные величины значительно ниже приведенных А.А. Чернышевым [20].

Вопреки нашим предупреждениям в адрес руководства Завидовской птицефабрики о необходимости сохранения этого участка в интересах водоохраны р. Дойбица на рубеже 1986 г. были осуществлены его дренаж и обвалование. Для этого была прорыта глубокая прямоточная канава, при этом время добегания потока по ней сократилось с 10–20 ч до 25 мин. Грязный, мутный, с неприятным запахом поток с большой скоростью устремился в р. Дойбица в зоне подпора Иваньковского водохранилища, внося значительное количество загрязняющих веществ в Иваньковское водохранилище, в том числе патогенную микрофлору, представляющую серьезную опасность для здоровья населения.

Продолжая на одном и том же участке наблюдения, мы получили уникальную возможность сравнить показатели качества воды до и после обвалования этого участка и определить роль ботанической площадки в формировании качества воды. В двух правых столбцах таблицы приведены данные наблюдений, из которых следует, что в новых условиях никаких положительных изменений в водотоке, как это было в период существования болотистого участка, не прослеживается.

Таким образом, на примере существования заболоченного участка с макрофитами на пути недоочищенных сточных вод после очистных сооружений Завидовской птицефабрики четко доказано участие гидробиоценоза на основе макрофитов для значительного улучшения качества воды.

Оценка очистительной способности макрофитов и ботанической площадки в целом относится к числу наиболее сложных и малоизученных вопросов.

А.И. Жуков и др. [5] считают возможным принять для расчетов,, что нагрузка водами для доочистки при образовании 100–200 стеблей на 1 м² камыша, тростника или рогоза должна составлять 2 м³/(м²-сут). Не приведены, однако, указания на качество воды на входе и выходе, а также сезонные изменения и другие сведения по очистке. Кроме того, число стеблей рогоза на 1 м², очевидно, завышено. К. Зайдель [29] допускала нагрузку 0,5 м³/(м²-сут) на камышовое биоплато.

В реальных условиях нагрузка на ботаническую площадку, вероятно, должна быть значительно ниже, особенно если допустить экологические нормы на концентрации в природной воде нитратов и фосфатов соответственно 0,2–0,3 и 0,01–0,02 мг/л [6]. В пользу этого говорят и данные по нагрузкам американских авторов [2, 16] при очистке стоков путем их распластывания по поверхности земли, заросшей многолетними травами при наличии водоупорного слоя. Ими допускается сброс 0,01–0,04 м³/(м²-сут). Уклон участка составлял 2–8%.

Исходя из наблюдений по сбросу недоочищенных сточных вод на Завидовской птицефабрике, а также литературных данных [2, 5, 16, 29], следует признать, что нормальная нагрузка для периода активной вегетации макрофитов в расчете на 1 м² площади с гелофитами не должна превышать 0,2 м³/(м²-сут). Эта величина может быть понижена или повышена, исходя из требований к качеству воды на выходе ботанической площадки и содержания отдельных загрязняющих веществ на входе в нее, а также учитывая сезонные изменения [22] и особенности ее действия.

На пути до ботанических площадок едва ли необходимо добиваться максимально полной доочистки сбросных вод от предприятий типа птицефабрик и животноводческих комплексов. Здесь надо исходить из реальных характеристик качества воды естественных водных объектов – приемников сбросных вод. Даже при отсутствии затрат на уход за естественно образовавшимися ботаническими площадками их положительный эффект по ряду параметров качества воды оказался весьма значительным. Он может резко возрасти даже при минимальных затратах на периодическую расчистку ложа и уборку избыточной фитомассы. Это приведет к снижению затрат на уход за прудами-отстойниками и даже к сокращению их площа-

дей. При выработке стратегии водоохранного сооружения необходимо опираться на очистные свойства биоты, формируя условия, способствующие максимальному проявлению ее способности к самоочищению воды.

Анализ литературы и собственные опыты показывают, что такие пути интенсификации процессов доочистки существуют. Опыт строительства метантенков свидетельствует о том [4], что важной задачей последних является создание тем или иным техническим путем условий, благоприятствующих развитию групп микроорганизмов, осуществляющих сбраживание трудноразалагаемых органических веществ. При этом необходимы соответствующие условия для развития и закрепления на твердых субстратах медленно растущих видов, способных к разложению до простых соединений типа CO_2 , CH_4 и NH_2 трудноразалагаемых стоков со свиноводческих, животноводческих и птицеводческих ферм.

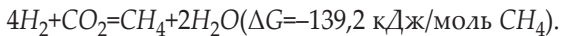
Первичные анаэробы (из групп *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butiriovibrio* и факультативные анаэробные микроорганизмы – *Escherichia coli*, *Bacillus* sp.) осуществляют гидролиз белков, липидов, полисахаридов с участием быстрорастущих видов гетеротрофных микроорганизмов. Легче разлагаются органические кислоты, моносахара и спирты с выделением H_2 , CO_2 , низкомолекулярных органических кислот и спиртов.

На второй стадии окисления участвуют ацетогенные микроорганизмы из групп *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Desulfovibrio*, производя ферментативные превращения H_2 , CO_2 , и более сложных веществ через систему обмена с участием ацетилкоэнзима А и осуществляя реакции с участием молочной кислоты: $CH_3CHOHCOOH + H_2O = CH_3COOH + CO_2 + 2H_2$; пропионовой кислоты: $CH_3CH_2COOH + 2H_2O = CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$; масляной кислоты: $CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O = 2CH_3COOH + 2H_2$ и этанола: $CH_3CH_2OH + 2H_2O = 2CH_3COOH + 2H_2$.

Следует заметить, что биохимия этих процессов изучена недостаточно.

На третьей стадии работают метанообразующие и сульфатредуцирующие бактерии в составе сложной популяции архебактерий, палочек, кокков (сарцин), вибрионов, спирилл. Они способны к глубокой переработке органического вещества, хотя, по-видимому, лигнин не разрушают. Необходимыми условиями их жизнедеятельно-

сти, в частности, являются полное отсутствие кислорода в среде и снабжение биостимуляторами и антибиотиками типа пенициллина и лизоцима, а также микроэлементами. Создание благоприятных условий по температуре, рН, наличию стимулирующих добавок, соотношению в очищаемой жидкости различных групп веществ, определяющих отношение C:N (требуется 10–25), регулирует скорость и глубину процесса деструкции компонентов в сточной жидкости или, что в принципе одно и то же, метаноредукции. Процесс описывается простейшим уравнением



Выше указывалось, что А. В. Францев, анализируя факторы самоочищения природной воды в реках, указывал на существование в них глубоких омутов, которые служат для долговременного захоронения и играют роль отстойников. Однако в этом плане свои представления он не развил. На наш взгляд, для трансформации загрязняющих веществ роль омутов чрезвычайно важна, поскольку в них создаются благоприятные условия для осуществления реакций глубокого анаэробного распада органических компонентов.

Анализ процессов метаболизма в пределах ботанических площадок с гелофитами при участии сопутствующей микрофлоры, которые вступают между собой в симбиотические отношения, способность таких гидробиоценозов исправлять и улучшать качество воды [2,5,10,11,16,24–28,30–34], а также анализ работы метантенков ставят вопрос об использовании некоторых элементов конструкции метантенков при создании искусственных ботанических площадок. В последних достаточно глубокая доочистка достигается сочетанием аэробных и анаэробных процессов деструкции органических загрязняющих веществ путем заложения специального нижнего слоя анаэробной доочистки под гелофитами, в котором должны быть обеспечены ток доочищаемой жидкости и ее контакт с верхним горизонтом корнеобитания растений. Вселение последних производится с помощью искусственных посадок, причем выбираются виды, достаточно эффективные в отношении исправления качества воды (в составе гидробиоценоза с другими организмами) и достаточно выносимые по отношению к составу сточной жидкости. Конструкция ботанической площадки должна обеспечивать устойчивый и равномерный ток жидкости по всей ее площади и глубине. Время

пребывания жидкости в ботанической площадке должно быть оптимальным для осуществления процессов разрушения или извлечения загрязняющих веществ из воды, а размеры площадки должны определять практическую эффективность в отношении объемов перерабатываемой жидкости.

Важное требование к ботанической площадке – возможность ее круглогодичной эксплуатации, а также экономическая целесообразность ее сооружения, обусловленная затратами на сооружение и эксплуатацию ботанической площадки по отношению к ее экологической эффективности.

Многообразие путей и способов очистки сточных вод, в том числе с использованием зарослей макрофитов, не привело, однако, к сколько-нибудь законченным представлениям в области теории ботанических площадок как биоинженерных очистных сооружений, оптимальности их конструкций и параметров. Ученые и инженеры в этом аспекте находятся во всех странах на стадии поисков.

Наивысшим уровнем организации ботанической площадки является, очевидно, ее сооружение на специально отведенном участке местности с созданием необходимого направленного уклона для потока воды и предупреждения ее застоя, с распластыванием потока на всю ширину площадки. Путем закладывания на ложе ботанической площадки гальки, щебенки или другого химически инертного материала на водоупорный грунт или на специальную водонепроницаемую пленку достигается фильтрация жидкости в двух горизонтах: в верхнем аэробном, в горизонте корнеобитания гелофитов и сопутствующей микрофлоры и в нижнем горизонте поселения на твердых, рыхло уложенных субстратах анаэробных микроорганизмов. Водообмен между горизонтами обеспечивается перемешиванием поднимающихся снизу газов и опусканием мелких частиц. Появляется также возможность осуществления круглогодичной доочистки, в том числе зимой под слоем снега и льда, когда отмирают наземные фотосинтезирующие органы растений и гетеротрофные процессы метаболизма протекают только в зоне корнеобитания. Повышенный удельный вес микроорганизмов в процессе доочистки благодаря подобной конструкции ботанической площадки выравнивает межсезонные колебания интенсивности разложения органических веществ.

В зарубежной литературе описаны опыты по очистке сточной жидкости на небольших искусственных моделях с растениями и даны некоторые расчеты.

Проведен анализ изменения величин редокс-потенциала E (от +400 до 0 мв) в ботанических площадках с увеличением глубины и показано, что при величинах E , равных 320 мв и ниже, нитратная форма азота делается неустойчивой и легко развивается денитрификация [31].

Сооружение ботанической площадки в виде многослойной биотехнической конструкции, включающей закладку дренажных труб на нижнем горизонте, практически едва ли осуществимо из-за дороговизны. Такие конструкции ботанических площадок [26] могут найти применение для изучения научных проблем, но не для практических целей доочистки сточных вод в широких масштабах.

В условиях штата Аризона (США) для удаления N из сточной жидкости были созданы и испытаны четыре параллельные площадки, названные грядами, с уклоном 1% и глубиной 0,76 м [24, 25]. Три из них были засажены соответственно камышом, тростником и рогозом, а четвертая оставлена для контроля без растений. Длина каждой гряды 18,5 м, ширина – 3,5 м. Для гидроизоляции снизу укладывался пластик, на него засыпались песок и гравий. По интенсивности удаления N камыш оказался наиболее эффективным (94% N), тростник занимал промежуточное положение (78%), рогоз был менее эффективен (28%); удаление на гряде без макрофитов было незначительным (11%). Высокая эффективность удаления N в грядах с камышом и тростником связывается с их способностью перемещать кислород в зону корнеобитания, что подтверждается данными [33, 34]. Эта способность у рогоза отсутствует.

Ризосфера в аэробной среде эффективна в превращении N из аммиачной в нитратную форму. Одновременно отмечалось, что в грядах с растениями происходило понижение величины ВПК. В процессах удаления N, его окисление преобладало над процессами поглощения макрофитами. Заметим, что в зарубежной практике для лучшего удаления N из очищаемой в метантенках жидкости добавляют в нее метанол, который способствует развитию групп микроорганизмов, наиболее активных в процессах денитрифика-

ции. Последние используют нитраты и нитриты как терминальные акцепторы электронов с восстановлением соединений N до его перевода в газообразное состояние или в форму его закиси [30].

Заопленные участки с макрофитами (примитивные ботанические площадки) также весьма эффективны в развитии денитрификации при условии обильного снабжения водной среды растворенным углеродом [16]. Удаление N внутри гряд с макрофитами достигает высоких значений при низких скоростях тока жидкости в нижнем слое, порядка 2 см в неделю, которое имеет место при достаточно плотной укладке песка и гравия. Последнее связано и с низким уклоном гряды (~1%). Достижимое удаление N из сточной жидкости на таких грядах составляет от 18 до 1 мг/л.

При внесении в среду метанола (или без него) основные процессы распада органических соединений и удаления N протекают в нижнем анаэробном слое. В период максимального увеличения фитомассы ее продукция равна 15–20 г/(м²·сут) в сухом веществе, при этом содержание N можно принять за 1%, а удаление N в гряде – до 0,2 г/(м²·сут). Это является пределом для камышовой гряды, так как только 12–16% удаления N можно отнести за счет растений [25].

В отечественной и зарубежной литературе приведены многочисленные данные по извлечению и накоплению биогенных элементов наиболее распространенными макрофитами, которые весьма перспективны в отношении их вселения на искусственные ботанические площадки. Приводимые различными авторами величины как по расчету фитомассы на единицу площади, так и по потенциальному накоплению ею N, P и других элементов достаточно близки. Их можно использовать в расчетах. Однако эти расчеты обычно приводятся за сезон вегетации и не учитывают сезонной изменчивости поглотительной и накопительной функций растений.

Во многих работах настоятельно рекомендуются выкашивание и удаление наземной фитомассы с целью извлечения с нею значительной части биогенных элементов и получения ценного сырья. Для приближенных расчетов можно принять что наземная и корневая биомассы многих гелофитов приблизительно одинаковы. По отечественным [10] и зарубежным источникам [25], верхний предел поглощения и удаления N тростником, камышом и рогозом составляет ~0,1 г/(м²·сут).

Величины выноса N и P за сезон с фитомассой тростника соответственно составляют 30 и 7,6 г в расчете на 1 м² зарослей. Это вдвое меньше потерь этих элементов в летний период на заросшей протоке Завидовской птицефабрики, если расчет проводить за сутки по разнице концентраций этих элементов на входе и выходе, и в 10–30 раз ниже потенциальной способности гелофитов извлекать N и P из раствора в период активного роста гелофитов, в начале лета.

Косвенным показателем участия заросшей протоки Завидовской птицефабрики в удалении биогенных элементов из сточной жидкости является сравнение показателей окисляемости и БПК_Г, (таблица) на входе и выходе заросшего рогозом и тростником участка водохранилища. Эти показатели указывают на окисление в сточной жидкости легкоокисляемых органических соединений. Хотя расчеты свидетельствуют об окислении здесь 3–8 г/(м²·сут) легкоокисляемых веществ, грунт пересыщен илистыми полуразрушенными частицами, которые постоянно накапливаются и из года в год задерживаются.

Все вышеуказанное говорит о необходимости интенсификации процессов доочистки сточной жидкости на пути к водному объекту, чему способствует создание благоприятных условий для поселения гетеротрофных микроорганизмов.

Строительство ботанической площадки как биоинженерного сооружения с очисткой сточной жидкости на разных горизонтах в целях наиболее полного разрушения и удержания загрязняющих веществ является, по сути, решением экологической задачи формирования единого гидробиоценоза искусственным путем с вселением выбранных видов макрофитов, спонтанным расселением вдоль оси тока жидкости гетеротрофных микроорганизмов, которые окажутся наилучшим образом приспособленными к составу жидкости, а также других организмов, которые все вместе образуют единую многоуровневую систему связей между собой и сложившимися абиогенными факторами среды.

Для удовлетворения главного требования, предъявляемого к ботанической площадке – быть достаточно эффективной и производительной при наименьших затратах средств на сооружение, технологичность, необходимо выдержать ряд условий.

Время пребывания очищаемой жидкости в пределах ботанической площадки должно быть минимальным при максимальной

эффективности очистки. В лабораторных опытах по разрушению различных загрязняющих веществ в присутствии макрофитов установлено, что если исключить весьма продолжительное время адаптации, то оптимальным будет период 1 сут. Такое время пребывания задается скоростью потока жидкости по всему сечению ботанической площадки и ее длиной. Наблюдения показали, что поверхностный ток жидкости сквозь заросли макрофитов при наклоне 2% равен 0,1 см/с.

В соответствии с расчетом скорости фильтрации по закону Дарси ($v=ki$, где v – скорость потока, k – коэффициент фильтрации, численно равный 3,5 см/с для гравия и щебня диаметром 4–7 мм, i – гидравлический уклон) скорость фильтрации в нижнем горизонте составляет 0,07 см/с. Таким образом, скорость потока будет равной по всему сечению ботанической площадки, а время пребывания в ней сточной жидкости – 1 сут – будет достигнуто при длине ботанической площадки до 100 м. Ширина ботанической площадки определяет расход очищаемой жидкости, но не может превышать разумных пределов для сохранения равномерного движения жидкости по всему сечению. Так как живой объем жидкости равен ~40% полного, при ширине площадки 10 м расход воды в такой ботанической площадке составил ~5 л/с.

Сравнение эффективности работы различных ботанических площадок удобно проводить, пользуясь константой K скорости превращений концентраций измеряемого ингредиента качества воды на входе $C_{вх}$ и выходе $C_{вых}$ ботанической площадки, измеряя ее длину l , ширину b , расход воды q и зная объем жидкости в ней ω , в соответствии с уравнением первого порядка

$$C_{вых} = C_{вх} e^{-K \frac{\omega}{q}}$$

или в более удобной форме интегрального уравнения

$$\ln \frac{C_{вых}}{C_{вх}} = -K \frac{\omega}{q}$$

Отсюда

$$K = \frac{q}{\omega} \ln \frac{C_{вх}}{C_{вых}}$$

Сравнение констант K_1, K_2, \dots, K_n для разного типа ботанических площадок послужит основой для выбора типа конструкции, вида

макрофитов, оптимальных параметров для их широкого внедрения в практику народного хозяйства с целью защиты водных объектов от различных загрязняющих веществ и биогенных элементов.

Необходимо осуществление мероприятий по вселению макрофитов путем извлечения корневищного грунта из мест их естественного произрастания, его перевозки и равномерного распределения по поверхности сооружаемой ботанической площадки.

Создание такой ботанической площадки требует применения современной строительной техники: экскаватора, бульдозера, самосвалов.

Опыт показал, что стоимость сооружения ботанической площадки составляет до 15 руб за 1 м², однако значительные затраты должны окупились улучшением санитарно-бактериологической обстановки на водоеме и сохранением здоровья населения.

Значительная протяженность ботанической площадки, медленное прохождение в ней тока доочищаемой жидкости создают условия для пространственного последовательного разделения анаэробных микроорганизмов-деструкторов на твердых субстратах. В результате должна происходить последовательная ступенчатая переработка загрязняющих веществ, которая может оказаться даже более глубокой, чем в метантенке или биопруде (в последнем отсутствуют условия для ступенчатого расселения микроорганизмов). Ток жидкости обусловлен направленным уклоном сооружения, а создание достаточно большого сечения каменистого слоя обуславливает возможность переработки относительно больших объемов загрязненной жидкости.

Модель ботанической площадки представлена на рисунке.

Цель инженерного сооружения ботанической площадки – осуществление последовательного процесса деструкции загрязняющих веществ по ходу стока доочищаемой жидкости в двух горизонтах: в верхнем, в зоне корнеобитания гелофитов и образуемых здесь биоценозов с грибами и другими аэробными микроорганизмами – гетеротрофами, а также в нижнем, анаэробном горизонте. Неплотная укладка в последнем на водоупорном ложе (которое при необходимости может быть выслано гидромелиоративной пленкой с засыпкой сверху тонкого защитного слоя песка) на глубину 0,5–0,7 м химически инертного материала (типа разнокали-

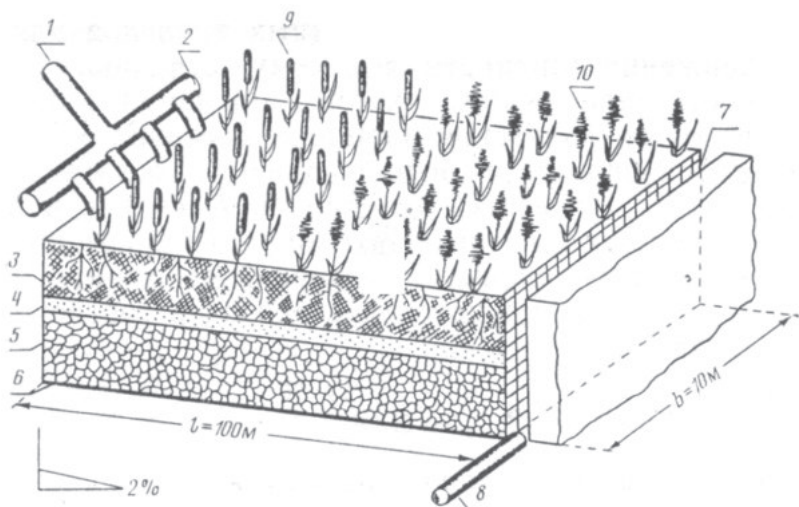


Рис. 1. Ботаническая площадка для доочистки сточных вод как биоинженерное сооружение

1 – входная труба; 2 – распределительная гребенка; 3 – корневищный грунт; 4 – песок; 5 – гравий или щебень; 6 – подложка; 7 – приемная траншея; 8 – выпускная труба; 9 – рогуз; 10 – тростник

берной гальки, крупной щебенки, обрезков керамзитовых труб или крупного стеклобоя) обеспечивает как субстрат для расселения колоний анаэробных микроорганизмов вышеперечисленных групп, так и медленный ток жидкости вдоль оси площадки.

Вследствие необходимости пространственного расселения анаэробных микроорганизмов в нижнем горизонте по всей длине ботанической площадки создание миниатюрных моделей ботанической площадки не дает представления об условиях доочистки на действующей ботанической площадке. Наряду с весьма медленным процессом «созревания» ботанической площадки, развития сложной корневой системы с формированием ее биоценоза и расселения микрофлоры в нижнем горизонте происходят весьма сложные процессы саморегулирования биоты и создание единой экосистемы для всей ботанической площадки. Здесь не исключено даже заселение спонтанно новыми видами макрофитов. Естественно, эти процессы на созданном биоинженерном сооружении будут развиваться не один сезон. Поэтому излишнее усложнение конструкции ботанической площадки может даже повредить интересам дела, и вме-

шательство в период созревания ботанической площадки должно быть минимальным. Естественными требованиями должны стать максимальное однообразие по составу подаваемой на ботаническую площадку сточной жидкости и абсолютное недопущение залповых сбросов с повышенными концентрациями тех или иных токсичных для биоты веществ.

Выбор видов макрофитов для заселения не столь уж велик [15]. Это прежде всего геллофиты, характерные для наших водоемов (камыш, тростник, рогоз, ситник, канареечник и др.). Конечно, выбор диктуется наличием в относительной близости необходимых количеств грунта с корневищами посадочного материала. Высев семенами резко замедляет сроки созревания биоты внутри ботанической площадки и создает другие трудности. Указанные виды весьма широко распространены в различных климатических зонах, их физиологические особенности изучены достаточно хорошо.

Технология посадок растений ручным способом при сооружении биоплато описана А.Р. Ореховским [14]. Автор настоящей статьи считает, что этот чрезвычайно трудоемкий и непроизводительный способ совершенно непригоден в настоящее время и может дискредитировать саму идею создания ботанических площадок. Одним из решающих условий при сооружении ботанических площадок как биоинженерных сооружений должна стать полная механизация всех видов работ, включая ремонт площадок. Отметим, что при нормальном режиме работы необходимость в постоянном наблюдении за площадками, их уходе и ремонте в течение ряда лет отсутствует.

Камыш превосходит многие геллофиты по активности доочистки сточных вод, но плохо переносит перегрузки повышенными концентрациями загрязняющих веществ. Кроме того, число мест в Подмоскowie, где возможно извлечение корневищного грунта растений камыша, ограничено или связано с транспортными неудобствами. Хорошо подходит для ботанических площадок тростник [14, 32–34], он выдерживает высокие солевые нагрузки [20], но более чувствителен, чем рогоз, к перегрузке высокими концентрациями компонентов животноводческих или иных подобных стоков. Рогоз достаточно легко укореняется, но плохо переносит затопление и растет при

очень низких уровнях воды. Опыты по вселению водяного риса на Учинском и Ивановском водохранилищах дали хорошие результаты: растение дает превосходную по качеству зеленую массу для скармливания животным, но у автора нет данных по использованию водяного риса [33, 34] или айра, обладающего особо ценными бактерицидными свойствами. Технология же посадок тростника или камыша описана рядом исследователей [14, 27, 29, 34].

При появлении зеленого ковра растений допускается постепенное увеличение попусков доочищаемой жидкости, начиная с 1,5–3 л/с. Контролем величины расхода служат определения показателей качества воды на выходе из ботанической площадки. В сооружаемых ботанических площадках в Старой Купавне Московской обл. и пос. Козлово Калининской обл. на протяжении первых 50 м ботанической площадки предусмотрена укладка корневищного грунта рогоза, а затем, до конца ботанической площадки, – тростника (см. рисунок).

Осенняя уборка наземной фитомассы (выше уровня воды) не только способствует выносу части биогенных элементов из водного объекта (в данном случае из ботанической площадки), но и улучшает последующее развитие этих растений, стимулирует их рост весной.

Предполагается, что разрабатываемая конструкция ботанической площадки более технологична по сравнению с ранее предложенными [24–26]; она должна обеспечить достаточно высокий эффект доочистки при конечном расходе воды ~ 10 л/с.

Создание серьезной математической модели работы ботанической площадки и расчетного аппарата для проектирования станет возможным после накопления опыта эксплуатации при разных конструкциях площадок, режимах нагрузок доочищаемыми водами, при разных видах гелофитов, изменении сезонных условий и т.д. [22]. На данном этапе работы представляется возможным только наметить некоторые пути решения задачи, опираясь в некоторой степени на условия доочистки в метантенках [3].

Выводы

Многообразие путей и способов очистки сточных вод, в том числе с использованием зарослей макрофитов, не привели к сколь-нибудь завершенным представлениям в области теории конс-

трукции и параметров ботанической площадки как биоинженерного сооружения. В этом направлении во всех странах исследователи и инженеры находятся на стадии поиска.

К ботаническим площадкам могут быть отнесены самые различные природные и искусственные заросшие макрофитами участки водных объектов па водосборной площади, служащие приемниками недоочищенных сточных вод и являющиеся проточными в направлении более крупного водного объекта.

Предлагаемое инженерное решение ботанической площадки заключается в создании условий для осуществления процесса деструкции загрязняющих веществ в двух горизонтах: верхнем аэробном, в зоне корнеобитания гелофитов, и в нижнем, где более полный распад загрязняющих веществ осуществляют анаэробные гетеротрофные микроорганизмы.

Эффективная доочистка сточных вод достигается хорошо сбалансированным взаимодействием всех представителей биоты, постепенно развившихся на ботанической площадке, со сложными системами взаимосвязей между собой и создавшими единый гидробиоценоз (эффективность доочистки определяется по контролируемым параметрам качества воды на выходе ботанической площадки).

Автор выражает искреннюю благодарность В. С. Каминскому за проявленный интерес к работе и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Эйнон Л.О. Регулирование зарастаемости мелководий водохранилищ гидроэлектростанций // Сб. науч. тр. Гидропроектта. 1985. Вып. 101. С. 18–24.
2. Бастиан Р. Системы естественной очистки сточных вод//Гражд. стр-во. 1982. №5. С. 4–12.
3. Вавилин В.А. Время оборота биомассы и деструкция органического вещества в системах биологической очистки. М.: Наука, 1986. 144 с.
4. Дубровский В.С, Виестур У.Э. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов Рига: Зинатне, 1988. 203 с.
5. Жуков А.И., Монгайт И.Л., Родзиллер И.Д. Методы очистки производственных сточных вод (справочное пособие). М.: Стройиздат, 1977. 204 с.
6. Красовский Г.И. К вопросу о едином эколого-гигиеническом нормировании биогенных элементов в воде // Матер. VI симпоз. «Современные проблемы самоочищения воды и регулирования качества

воды». Секция II. Ч. II. Таллинн: Изд-во Таллин, политехи, ин-та, 1979. С. 22–24.

7. Мадалиева Г.К. Флора и растительность сбросовых водоемов Ташкентского оазиса и их роль в самоочищении вод: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ташкент, 1975. 25 с.

8. Методические указания по уборке и использованию высших водных растений в качестве грубых кормов для сельскохозяйственных животных/Сост. Якубовский К.Б., Таран О.Н., Мережко А.И. и др. Киев: Ин-т гидробиологии АН УССР, 1984. 35 с.

9. Морозов Н.В. Использование макрофитов для очистки стока сельскохозяйственных угодий // Вод. ресурсы. 1984. №3. С. 131–141.

10. Морозов Н.В., Теличченко М.М. Загрязнение водоемов стоками животноводческих комплексов и биометоды их обеззараживания//Самоочищение воды и миграция загрязнений по трофической цепи. М.: Наука, 1984. С. 22–29.

11. Об очистке сточных вод макрофитами и альгофлорой//Вод. ресурсы. 1976. №5. С. 185–190.

12. Оксийок О.П., Стольберг Ф.В. Управление качеством воды в каналах. Киев: Наук, думка, 1986. 171 с.

13. Оксийок О.П., Стольберг Ф.В., Олейник Г.Н. и др. Биоплато и его применение на каналах // Гидротехника и мелиорация. 1980. №8. С. 66–70.

14. Ореховский А.Р. Применение тростника и камыша для биологического крепления подводных откосов песчаных дамб//Лесоводство и агромелиорация. 1965. №1. С. 114–125.

15. Ореховский А.Р. Защитный эффект полуводных растений//Гидротехника и мелиорация. 1982. №7. С. 32–37.

16. Рид Ш., Бастиан Р., Джоуэлл В. Использование аквасистем для доочистки сточных вод//Гражд. стр-во. 1981. №6. С. 2–7.

17. Саава А.Э. Современное состояние и перспективы развития санитарно-гигиенических аспектов качества воды // Матер. VI симпоз. «Современные проблемы самоочищения воды и регулирования качества воды». Секция II. Ч. II. Таллинн: Изд-во Таллин, политехи, ин-та, 1979. С. 3–11.

18. Францев А.В. Вопросы эксплуатации источников водоснабжения Москвы // Учинское и Можайское водохранилища. М.: Изд-во МГУ, 1963. С. 9–15.

19. Францев А.В. Некоторые вопросы управления качеством воды // Теория и практика биологического самоочищения загрязненных вод. М.: Наука, 1972. С. 24–28.

20. Чернышев А.А. Очистка шахтных вод Донбасса растительностью и прудами-накопителями//Вод. ресурсы. 1979. №2. С. 173–178.

21. Шаповалова Л.М. Об изменении состава гидробионтов в процессе очистки сточных вод в биопрудах//Узб. биол. журн. 1983. №6. С. 7–10.

22. Эйно́р Л.О. Значение высшей водной растительности в самоочищении природных вод//Проблемы охраны природы. Байкальск: Изд-во Ин-та экологической токсикологии Минбумпрома СССР, 1984. С. 35–37.

23. Boyd C.E. Vascular aquatic plants for mineral nutrient removal from polluted waters //Econ Bol. 1970. V. 24. №1. P. 95–103.

24. Gersberg R.M., Elkins B.V. N-removal in artifical wetlands//Water Res. 1983. V. 17. №9. P. 1009–1014.

25. Gersberg R.M., Elkins B.V., Lyon S.R., Goldman C.R. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artifical wetlands//Water Res. 1986. V. 20. №3. P. 363–368.

26. Haberl R., Diebold №., Parsian R. Darstellung verschidener Systeme der Abwasserreinigung mit Makrophyten//Osterreichische Wasserwirtschaft. 1983. B. 35. №9–10. S. 213–225.

27. Hoffman K. Wachstumsverhalten von Schilf (*Phragmites australis* [Cav.] Trin ex Steudel) in Klarschlammbeschichtenen Filterbeeten//Arch. Hydrobiol. 1986. B. 107. №3. S. 385–409.

28. de Jong J. The purification of wastewater with the aid of rush or reed ponds//Biological control of water pollution/Ed. Tourbier J., Pierson R.W. // Philadelphia, P.A.: Univer. of Penns. Press, 1976. P. 123–132.

29. Seidel K. Makrophytes and water purification//Biological control of water pollution/Ed. Tourbier J., Pierson R. W.//Philadelphia, P. A.: Univer. of Perms. Press, 1976. P. 123–132.

30. Sharma B., Ahler R. C. Nitrification and nitrogen removal //Water Res. 1977. V. 11. №10. P. 897–921.

31 Spangler F. L., Sloeg W., Fetter C. W. Experimental use of emergent vegetation for the biological treatment of municipal wastewater in Wisconsin //Biological control of water pollution/Ed. Tourbeir J., Pierson R.W. /Philadelphia, P. A.: Univer. of Penns. Press, 1976. P. 161–171.

32. Wathugala A.C, Suzuki T., Kurichara I. Removal of N, P, COD from wastewater using sand filtration system with *Phragmites australis*//Water Res. 1987. V. 21. №10. P. 1217–1224.

33. Yamasaki S., Tange Growth responses of *Zizania latifolia*. *Phragmites australis* and *Miscanthus sacchariflorus* to varying inundation//Aquatic Bot. 1981. V. 10. №2. P. 229–239.

34. Yamasaki S. Role of plant aeration in zonation of *Zizania latifolia* and *Phragmites australis*//Aquatic Bot. 1984. V. 18. №2. P. 287–297.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

**ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ
ИНСТИТУТА ВОДНЫХ
ПРОБЛЕМ РАН
1967–2017**

Том 1

Компьютерная вёрстка
Е.В. Орешкина, А.И. Бурмистрова

Подписано в печать 11.09.2017
Формат 60×90 1/16. Уч.-изд. л. 42,0. Усл. печ. л. 40,0
Бумага офсетная. Гарнитура Palatino Linotype. Печать офсетная
Тираж 300 экз.

ТК 674548–939911–110917

ООО Издательство «КУРС»
127273, г. Москва, ул. Олонская, д. 17А, офис 104
Тел.: (495) 203-57-93
E-mail: kursizdat@gmail.com, <http://www.kursizdat.ru>

Федеральное агентство научных организаций
Институт водных проблем Российской академии наук

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ
ИНСТИТУТА ВОДНЫХ
ПРОБЛЕМ РАН

1967–2017

Том 2

Москва
КУРС
2017

Ответственный редактор – доктор физико-математических наук А.Н. Гельфан
Составитель – кандидат технических наук М.И. Степанова

Избранные труды Института водных проблем РАН: 1967–2017: В 2-х т. –
М.: КУРС, 2017. – Т. 2. – 720 с.

ISBN 978-5-906923-74-5 (КУРС)

ISBN 978-5-906923-76-9 (КУРС, общ.)

Во втором томе представлены статьи ведущих учёных – лидеров основных научных направлений в своей области, работающих в настоящее время в Институте водных проблем РАН. Тематика статей посвящена фундаментальным проблемам гидрологии суши, гидрохимии, гидробиологии, гидродинамики, гидрофизики включая проблемы исследования и моделирования гидрологического цикла суши, формирования поверхностных, почвенных и подземных вод, качества вод, состояния водных и наземных экосистем, возможных изменений водных ресурсов под влиянием природных и антропогенных факторов, рационального водопользования, стратегии управления водными ресурсами и водоохранной деятельностью, экономики водопользования и др.

Представляет интерес для специалистов в области изучения и использования вод суши.

ISBN 978-5-906923-74-5 (КУРС)

ISBN 978-5-906923-76-9 (КУРС, общ.)

© Коллектив авторов, 2017

© Институт водных проблем РАН, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Процессы гидрологического цикла суши

- Кучмент Л.С.* Развитие методов гидрологических прогнозов
и смена их парадигмы. 5
- Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Проблемы изучения и моделирования
взаимодействия поверхности суши с атмосферой 25
- Мотовилов Ю.Г.* Моделирование полей характеристик речного
стока 47
- Гельфан А. Н.* Динамико-стохастические модели со случайными
входами в приложении к задачам гидрологии речных
бассейнов. 71

Гидродинамические, гидрофизические и гидрохимические процессы в водных объектах

- Дебольский В. К., Дебольская Е.И., Долгополова Е.Н., Масликова О.Я.,
Грицук И.И., Ионов Д.Н.* Проблемы и современные
исследования гидродинамики русловых потоков
и ледотермики 101
- Зырянов В.Н.* Нелинейная волновая диффузия в геосредах:
пампинг-эффект 125
- Бреховских В.Ф., Перекальский В.М., Волкова З.В., Брезгунов В.С.,
Вишневская Г.Н., Кременецкая Е.Р.* Исследование процессов
переноса загрязняющих веществ в водных объектах:
теория и эксперимент 162
- Вавилин В.А.* Кинетический изотопный эффект как следствие
динамики химических и биологических процессов:
образование метана и его аэробное и анаэробное
окисление 192

Проблемы гидрологии суши и технологии гидрологических исследований

- Добровольский С.Г.* Современное состояние и проблемы глобальной гид-
рологии 214
- Михайлова М.В., Михайлов В.Н.* Современное состояние
и перспективы гидрологии устьев рек 252
- Музылёв Е.Л., Курбатова* Использование данных дистанционного
зондирования для гидрологических исследований
в ИВП РАН: ретроспектива и современные достижения. . . 281
- Ферронский В.И.* Изотопная гидрология: пути развития
и решаемые проблемы 313

Стохастическая гидрология

- Болгов М.В.* Развитие идей стохастической гидрологии в ИВП РАН . 390
Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровней
естественных озер: основные исследования ИВП РАН
за 1967–2017 гг. 412

Управление водными ресурсами, проблемы водопользования и оценки водообеспеченности

- Данилов-Данильян В.И.* Экономические проблемы управления
водными ресурсами и водным хозяйством 429
Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Водопользование в условиях
неопределенности. 454
Джамалов Р.Г. Изучение и оценка подземного стока и ресурсов
пресных подземных вод как основы их рационального
использования и охраны. 487
Бухарицын П.И. Оценка современного состояния водообеспеченности
района Западных подступных ильменей 513

Качество вод суши и гидроэкология

- Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Сухоруков Б.Л., Бакаева Е.Н.*
Экологотоксикологические исследование и моделирование
качества водных ресурсов юга России. 539
Эльпинер Л.И. Развитие медико-экологических исследований
водных проблем в ИВП РАН. 565
Веницианов Е.В., Чиганова М.А., Аджиев Г.В. Современные проблемы
оценки, регулирования и мониторинга качества
поверхностных вод 606
Новикова Н.М., Кузьмина Ж.В. Изучение и оценка гидрогенной
динамики экосистем 628
*Джамалов Р.Г., Никаноров А.М., Решетняк О.С., Мягкова К.Г.,
Сафронова Т.И.* Качество вод бассейна р. Оки и степень
их загрязнения. 671
Авторы статей. 690

ПРОЦЕССЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА СУШИ

Развитие методов гидрологических прогнозов и смена их парадигмы

Л.С. Кучмент

Гидрологические прогнозы – один из наиболее важных разделов прикладной гидрологии, в котором разрабатываются методы предсказания возможных временных изменений количественных характеристик гидрологических процессов для повышения эффективности управления водноресурсными системами при их хозяйственном использовании и минимизации возможных ущербов, связанных с опасными гидрологическими явлениями,

В течение длительного времени методы прогнозирования представляли собой в основном простые уравнения регрессии, полученные графическим методом или с помощью статистического анализа имеющихся рядов гидрометеорологических измерений воздействий на речной водосбор и речного стока. Исключение составляли методы прогнозов водного режима, основанные на упрощённых моделях движения воды в речных руслах, при которых объём вычислений сравнительно невелик.

Возможности разработки методов гидрологических прогнозов радикально изменились в 1960-е гг., когда появились быстродействующие электронные вычислительные машины и проблема допустимого объёма вычислений начала исчезать. К этому времени накопились также значительные материалы экспериментальных исследований гидрологических процессов и достаточно длинные ряды гидрометеорологических наблюдений за формированием речного стока в различных физико-географических условиях, позволившие существенно уточнить представления о механизмах формирования стока, что создало видимость разработки для прогнозов стока сложных математических моделей, включающих описание различных гидрологических процессов. Совершенствование методов измерения пространственно-временных изменений гидрометеорологических воздействий на водосбор (радарные измерения интенсивности осадков, аэрокосмическая съёмка полей снегозапасов и влажности почвы, спутниковые методы измерения эвапотранспирации) и создания гео-

информационных систем способствовала разработке моделей формирования стока, позволяющих воспроизводить пространственную картину составляющих гидрологического цикла в речном бассейне (модели с распределёнными параметрами). Однако из-за недостатка метеорологических измерений и характеристик водосбора для практических расчётов и прогнозов чаще применяются модели стока, в которых метеорологические воздействия на водосбор и характеристики водосбора, а также используемые зависимости и параметры считаются осреднёнными по выбранным площадям и сосредоточенными в точке (такие модели называют моделями с сосредоточенными параметрами).

За время, прошедшее с момента появления в практике гидрологического прогнозирования компьютеров, были созданы десятки разнообразных моделей формирования стока, отличающихся использованием разных представлений о гидрологических процессах и пространственно-временными масштабами воспроизведения гидрологических явлений.

Модели, которые в настоящее время для гидрологических прогнозов, можно разделить на три группы [1].

1) Модели, где гидрологическая система, в которой отсутствуют взаимодействия различных гидрологических процессов, рассматривается как «черный ящик» и априорная информация о структуре и параметрах гидрологической системы полностью игнорируется или используются лишь общие гипотезы о механизмах генезиса стока и идентификация гидрологической системы (определение структуры и параметров модели) производится путём подбора (калибровки) по данным наблюдений на её входе и выходе.

2) Модели, при построении которых используются упрощённые физические представления о взаимодействии различных гидрологических процессов и эмпирические зависимости, которые могут быть применены при определении структуры модели или её параметров (такие модели в гидрологии обычно называют концептуальными). В общем виде концептуальные модели представляют собой обыкновенные дифференциальные уравнения. Большинство параметров концептуальных моделей нельзя находить путём измерений и их калибруют, причём число их при сложных условиях формирования стока может быть достаточно большим (18–20). Из-за ограни-

ченности данных, несовершенства моделей и взаимосвязей между параметрами модели небольшое увеличение числа параметров может создавать значительные трудности при калибровке параметров. Поэтому необходимо, чтобы число параметров было совместимым с надёжностью входных данных и требуемой точностью. В настоящее время применяются разнообразные методы автоматической и ручной калибровки параметров, которые значительно облегчают выбор оптимальных значений параметров, однако применение этих методов требует достаточно длинных рядов наблюдений и внимательной проверки качества калибровки по данным, неиспользовавшимся при калибровке.

3) Физико-математические модели, основанные на достаточно полных физических представлениях о процессах формирования стока, и параметры которых могут быть выражены через измеряемые или заданные априорно физические константы. В общем виде эти модели представляют собой уравнения в частных производных и позволяют учитывать пространственную изменчивость гидрологических процессов и параметров моделей.

Модели типа «чёрного ящика» с включением некоторых эмпирических зависимостей получили наибольшее распространение для прогнозов гидрографа стока в речных руслах. В частности, широко используются из-за простоты определения их параметров и сравнительно небольшого объёма необходимой исходной гидрометрической информации линейные модели с сосредоточенными параметрами, основанные на применении интеграла Дюамеля, единичного гидрографа, методов Маскингама, Калинина–Милюкова [1]. Во многих работах применяются нелинейные модели с сосредоточенными параметрами, используются нелинейные связи расходов воды на входе и выходе речных участков с объёмами воды на этих участках. Для сложных речных русел применяются модели, основанные на связи входного и выходного гидрографа в виде функционального ряда Вольтерры в квадратичном приближении [1]. В качестве примера такого подхода можно привести построение модели Нижней Волги, где нелинейное преобразование входного гидрографа разбивается на две последовательные операции: преобразование с помощью линейных систем, функции влияния, которых представляют собой нормированные функции Лагерра, и

нелинейное безынерционное преобразование. В итоге полученная связь входного и выходного гидрографов включает 7 параметров, которые находятся путём подбора.

Особой категорией моделей «чёрного ящика» являются искусственные нейронные сети [2]. Подобно мозгу, искусственные нейронные сети образуются путём соединения простых нелинейных систем (нейронов), связь входа и выхода которых можно представить в виде сигмоиды или гиперболического тангенса. Соединённые между собой нейтроны, образуют скрытую сеть с произвольным расположением нейронов в различных слоях и различными межслойными соединениями. В процессе обучения с помощью проб и ошибок по данным наблюдений на входе и выходе всей сети определяется число скрытых нейронов в сети, их расположение и параметры описывающих их зависимостей. Выбор структуры модели «чёрного ящика» значительно упрощается и калибровка модели становится более надёжной, если при этом удастся хотя бы частично использовать физические соображения и представления о моделируемых процессах. Ряд работ по применению искусственных нейронных сетей для моделирования гидрологических систем показывает, что с помощью этого метода удастся добиться высокой точности воспроизведения выходных переменных, однако при этом надёжность и точность прогнозов может быть низкой, т.к. физическая структура реальной гидрологической системы может значительно отличаться от той, которая находится методом проб и ошибок.

Наибольшее применение в краткосрочных гидрологических прогнозах речного стока получили концептуальные модели. При разработке методов краткосрочных прогнозов обычно имеются достаточно длинные ряды наблюдений, что обеспечивает достаточную точность для определения параметров концептуальных моделей. Использование концептуальных моделей формирования стока и систем, обеспечивающих эти модели текущей гидрометеорологической информацией и метеорологическими прогнозами в автоматическом режиме, способствовали внедрению в оперативную практику систем гидрологического прогнозирования, с помощью которых можно выпускать непрерывные прогнозы стока различной заблаговременности по всем основным створам информационной

сети речных систем. Так, например, в США непрерывные ежедневные прогнозы речного стока выпускаются по данным гидрометеорологическим наблюдений и метеорологических прогнозов по более, чем по 4000 створов. Плотная информационная сеть пунктов, для которых выпускаются ежедневные гидрологические прогнозы, охватывает и территорию Европейского Союза. Постоянно ведутся работы по повышению точности и надёжности гидрологического прогнозирования путем улучшения качества используемых моделей формирования стока и привлечения дополнительной исходной информации.

Физико-математические модели формирования речного стока разрабатываются на основе физико-математических описаний гидрологических процессов и использования материалов лабораторных и полевых экспериментальных исследований, что позволяет с достаточной полнотой воспроизводить сложные механизмы формирования стока и связанного с ним широкого круга гидрологических явлений. Из таких механизмов особо следует выделить процессы в мёрзлых грунтах, впитывание талой воды в мёрзлую почву, образование в почве запирающих слоёв вследствие наличия в ней переохлажденной жидкой воды. От величины накопления твёрдых осадков, физических свойств снега и погодных условий зависит интенсивность поступления воды на водосбор в период снеготаяния. Плотность свежевыпавшего снега определяется главным образом метеорологическими условиями в момент выпадения осадков. С течением времени снег уплотняется и оседает под действием собственного веса. Наряду с механическим уплотнением происходит преобразование ледяных кристаллов и структуры снега. Для прогнозов дождевого стока важное значение имеет описание вертикального переноса почвенной влаги с учётом взаимодействия стока с растительным покровом. Однако возможности практического применения этих моделей для гидрологических прогнозов оказались весьма ограниченными, т.к. качество моделирования стока зависит не только от полноты и детальности математического описания физических процессов, но и от наличия измерений характеристик речных бассейнов, в которых эти процессы происходят. Входящие в модели коэффициенты (параметры) должны быть согласованы по физическому смыслу и пространственно-временным

масштабам с выбранной схематизацией описываемых физических процессов. Часть параметров моделей формирования стока удастся определить по априорной информации или по данным прямых измерений характеристик водосбора, но большинство параметров приходится калибровать. Чем сложнее структура выбранной модели, тем более трудной и неопределённой становится задача калибровки параметров и увеличиваются требования к объёму и качеству исходной экспериментальной информации. При недостаточной обеспеченности экспериментальной информацией уточнение математического описания физических процессов, происходящих в речном бассейне, может приводить к снижению точности определения параметров и в итоге снижения точности всей модели. В то же время можно предположить, что детальные модели формирования речного стока могут обладать значительной избыточностью в воспроизведении гидрологических процессов для многих практических задач, и эта избыточность может приводить к уменьшению возможной достигаемой точности интересующих потребителя величин. Важным преимуществом физико-математических моделей является увеличение возможностей усвоения различных видов гидрометеорологической информации по сравнению с концептуальными моделями. Всё это делает весьма естественной гипотезу, что физико-математические модели формирования стока при их должном обеспечении экспериментальной информацией могут существенно расширить области воспроизведения возможных гидрологических явлений и давать бóльшую точность, чем модели с сосредоточенными параметрами. Однако в современных условиях необходимое для развитых физико-математических моделей формирования стока обеспечение информацией встречается достаточно редко и при решении массовых практических задач приходится использовать ограниченную экспериментальную информацию. В то же время во многих случаях оказывается возможным осуществить такой выбор модели или её упрощения, при котором оказывается возможным удовлетворить требования к точности расчёта интересующих потребителя величин. Модели формирования речного стока с распределёнными параметрами значительно расширяют возможности использования информации о пространственных изменениях характеристик речного стока бассейна и метеорологи-

ческих воздействиях на водосбор. Это даёт возможность получать качественную картину пространственных изменений составляющих водного баланса внутри водосбора (то, что не дают модели с сосредоточенными параметрами). Однако для получения достаточной точности расчёта стока в замыкающем створе речного водосбора необходима, как правило, калибровка значительно большего количества параметров, чем при использовании моделей с сосредоточенными параметрами. Национальная служба погоды США организовала в 2002 г. обширный международный проект по сравнению возможностей использования моделей стока с сосредоточенными и распределёнными параметрами для краткосрочных гидрологических прогнозов. В первой фазе этого проекта расчёты гидрографа в замыкающем створе речных бассейнов полученные с помощью модели с сосредоточенными параметрами, используемой для прогнозов на всей территории США, сравнивалась с расчётами для нескольких водосборов, расположенных в Оклахоме, по 12 моделям с распределёнными параметрами, разработанными в разных странах. Результаты сравнения рассчитанных в замыкающих створах гидрографов неожиданно показали, что концептуальная модель НСП США дала заметно большую точность, чем модели с распределёнными параметрами. В среднем модели с распределёнными параметрами дали улучшение точности расчёта объёмов стока лишь в 14% расчётных гидрографов, улучшение точности расчёта максимального расхода в 33% и времени наступления пика гидрографов в 22%. В связи с этим НСП США приняла решение провести вторую фазу проекта на большом числе водосборов и с более качественными данными наблюдений. В новых экспериментах участвовали 16 моделей с распределёнными параметрами и 2 модели с сосредоточенными параметрами. Использования проводились по данным наблюдений на 16 равнинных водосборах, расположенных в Оклахоме, и на 2 горных водосборах, расположенных в Сьерра-Неваде. Результаты этих экспериментов оказались близкими к тем, которые были получены в первой фазе проекта. Модели с распределёнными параметрами дали улучшение расчётов объёма стока лишь для 18% гидрографов для равнинных рек, максимального расхода для 24% и времени наступления пика для 28%. Для горных рек получено соответственно – 24%, 12%, 41%.

В последние десятилетия точность и надёжность гидрологических прогнозов, а также плотность пунктов, для которых они выпускаются значительно возросли. Внедрение в оперативную практику моделей формирования стока и увеличение объёма гидрометеорологической информации способствовали разработке автоматизированных систем гидрологического прогнозирования, предназначенных для выпуска непрерывных прогнозов на различные сроки. В то же время необходимость увеличения безопасности гидротехнических сооружений, расширения экологических требований, повышения эффективности использования водноресурсных систем требуют всё более полного и осторожного использования гидрологических прогнозов с учётом имеющихся неопределённостей в исходных данных и возможных ошибок в методиках гидрологических прогнозов.

Исследования по разработке методов оценки возможных неопределённостей и ошибок в гидрологических прогнозах, а также стремительный рост вычислительных мощностей, лучшее понимание физики и динамики гидрологических систем и увеличивающаяся доступность гидрологических наблюдений привели к качественному изменению парадигмы гидрологического прогнозирования: в настоящее время в развитых странах начал осуществляться переход от детерминированных (однозначных) прогнозов к вероятностному прогнозированию, позволяющему предсказывать не только наиболее вероятные значения прогнозируемых величин, но и оценивать вероятности экстремальных и редких событий [4, 5].

Основными источниками неопределённости в гидрологическом прогнозировании являются ошибки в метеорологических прогнозах и измерениях, используемых в качестве входной информации, и неопределённость, связанная с гидрологическими расчётами (пространственно-временные ошибки в задании начальных условий, неопределённость в выборе структуры моделей и калибровке их параметров, ошибки измерений на выходе гидрологической системы). Возможности общей оценки неопределённости прогноза зависят от сложности используемой гидрологической модели и исходной информации. В общем виде решение этой задачи может быть получено аналитическими методами или методом Монте-Карло путём замены динамической модели динамико-стохастической с использованием вероятностных распределений параметров и вход-

ных данных. В [3] предложен общий формальный байесовский подход к анализу неопределённостей, который позволяет отдельно учесть неопределённость, обусловленную входными данными и ошибками модели. Однако возможности аналитических методов весьма ограничены, а использование метода Монте-Карло для учёта нескольких источников неопределённости из-за «проклятия размерности» может приводить к огромным, а иногда и нереальным затратам машинного времени. В связи с этим во многих работах делаются попытки объединить источники неопределённости разного происхождения эмпирическим путём, используя имеющиеся измерения метеорологических и гидрологических величин. При определении возможной заблаговременности прогноза и оценки риска его использования важно выбрать соответствующие показатели качества прогнозов. В отличие от обычно принятых оценок детерминистических прогнозов, где основным критерием эффективности прогнозов является отклонение прогнозируемых величин от априорно задаваемых (например, климатической нормой или инерционно задаваемых величин), качество вероятностных прогнозов оценивают по нескольким показателям с учётом требований потребителя прогнозов. При выборе этих показателей, которые могут использоваться в виде численных критериев, диаграмм или гистограмм, стремятся обеспечить надёжность прогнозов (близость вероятностного прогноза к средней частоте прогнозируемого события, определённой по данным наблюдений за период верификации прогнозов), отчётливость (возможность оценивать вероятность событий, вероятность которых близка к 0 или 1) и, наконец, разрешающую способность (способность отличить относительную частоту появления прогнозируемого события при прогнозах от относительной частоты его появления по данным наблюдений за период верификации) [1]. Учитывая сложность пространственной картины развития гидрологических процессов в речной системе и недостаточную точность метеорологических прогнозов, вместо прогнозирования расходов воды как непрерывных величин часто ограничиваются прогнозированием бинарного события: превысит или не превысит расход воды заданную критическую величину (заданный порог). Для количественной оценки эффективности вероятностных прогнозов чаще всего используются два критерия, основанные на

сопоставлении безусловных интегральных распределений прогнозируемых и фактических величин стока [6, 7]:

1. Среднее отклонение прогнозируемых и фактических интегральных распределений вероятности

$$EM = \mu_f - \mu_o,$$

где μ_o и μ_f – безусловные средние значения интегральных вероятностей фактических и спрогнозированных величин стока в заданном интервале его изменений, соответственно.

Этот критерий позволяет выявить наличие систематических погрешностей прогноза.

2. Относительная среднеквадратическая погрешность прогноза интегральных вероятностей (Ranked Probability Skill Score)

$$RPSS = 1 - \frac{RPS}{RPS^*},$$

где RPS – сумма квадратов отклонений прогнозируемых и фактических интегральных распределений вероятности, равная

$$RPS = (\mu_f - \mu_o)^2 + (\sigma_f - \sigma_o)^2 + 2(1 - \rho_{of})\sigma_f\sigma_o,$$

σ_o и σ_f – среднеквадратические отклонения интегральных вероятностей фактических и спрогнозированных величин стока, соответственно; ρ_{of} – коэффициент корреляции между интегральными вероятностями фактических и спрогнозированных величин стока; RPS^* – погрешность климатического прогноза (по фактическому ряду значений стока, без использования модели). Критерий $RPSS$ позволяет оценить степень уменьшения природной неопределённости процесса, достигаемого с помощью прогноза.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке методов вероятностных прогнозов и учёта их неопределённости оказалось так называемое ансамблевое прогнозирование, при котором прогнозы представляют собой ансамбли прогнозируемых величин, полученных путём моделирования гидрологических процессов при задании исходной информации в виде ансамблей входных данных или различных сценариев неопределённостей, содержащихся в исходных данных (ошибки модели, ошибки в начальных условиях и входов, ошибки параметров гидрологических моделей, и т.д.).

Разработка методов ансамблевых гидрологических прогнозов началась с исследования возможностей использования для гидрологического прогнозирования ансамблевых прогнозов погоды. Чис-

ленные решения гидродинамических уравнений погоды являются неустойчивыми и весьма чувствительными к изменениям начальных условий, методам описания подсеточных процессов, выбору численных схем и пространственно-временных шагов. Мелкомасштабные ошибки в задании исходных полей элементов погоды могут неограниченно возрастать во времени, искажая предвычисляемую динамику крупномасштабных метеорологических процессов. Это приводит к тому, что прогнозы погоды заблаговременностью более двух суток в зависимости от способов задания начальных условий, используемой модели погоды или способов решения гидродинамических уравнений могут существенно отличаться. Развитие вычислительной техники и появление суперкомпьютеров создало возможности для многократного выпуска прогнозов погоды по одной исходной информации, но при разных способах учёта начальных условий или с помощью различных прогностических схем. В результате прогноз погоды представляется на интервале прогнозирования в виде ансамбля («спагетти») 20–50 численных решений уравнений погоды, что даёт возможность определить возможный разброс прогнозируемых величин.

Разработка методов ансамблевых гидрологических прогнозов началась с исследования возможностей использования ансамблевых прогнозов погоды для гидрологического прогнозирования. В дальнейшем оказалось, что подходы, использованные для ансамблевого прогнозирования погоды, являются весьма продуктивными и для гидрологических прогнозов, где ансамблевые метеорологические прогнозы не используются. Привычные для современного пользователя детерминистические (однозначные) гидрологические прогнозы позволяют определять лишь математическое ожидание прогнозируемой величины, игнорируя информацию об её менее вероятных значениях. Однако для выбора оптимальных решений при управлении водными ресурсами важна также информация о различных квантилях прогнозируемых величин и оценка вероятности редких катастрофических явлений. Поэтому при разработке методов гидрологических прогнозов желательно обеспечить успешность прогнозирования не только математического ожидания, но и различных квантилей прогнозируемых величин. Представление гидрологических прогнозов в виде ансамблей прогнозируемых величин

или их вероятностных распределений при соответствующем выборе критериев качества прогнозов позволяет существенно расширить используемую информацию и облегчить выбор оптимального горизонта прогнозирования. На примере конкретных водноресурсных систем показано, что использование ансамблевых прогнозов стока обеспечивает большую экономическую эффективность, чем детерминистические прогнозы [8]. Ансамблевые прогнозы, однако, не могут учесть все возможные факторы неопределённости, и необходимо выявлять наиболее важные неопределённости для различных процессов формирования стока и гидрологических моделей, а также для различных прогнозных горизонтов и доступных гидрометеорологических наблюдений. В ряде работ показано, что ансамблевые гидрологические прогнозы вместе с увеличением выпускаемой информации о развитии гидрологических явлений обеспечивают и более высокую заблаговременность прогнозов

Исследования по разработке методов краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов и определения их возможной заблаговременности проводились в многочисленных гидрологических прогностических центрах. В работах [3, 4], представлены результаты 38 таких исследований. Эти исследования показывают возможный горизонт таких прогнозов, надёжность определяется качеством прогнозов погоды и размерами водосбора. Многие центры прогнозирования наводнений в разных частях мир ограничиваются сейчас ансамблевым прогнозированием только на основе ансамблевых краткосрочных метеорологических прогнозов В Национальной службе погоды (НСП) США проведена работа по разработке и верификации методов ансамблевых гидрологических прогнозов с использованием выпускаемых НСП ансамблевых прогнозов температуры и осадков и ведутся работы по организации службы ансамблевых гидрологических прогнозов во всех речных прогностических центрах США. Многочисленные исследования по разработке методов краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов и оценке их возможной заблаговременности проводились и для европейских рек. С 2003 г. под эгидой Европейской Комиссии ЕС разрабатывается система оповещения о наводнениях для всей Европы с использованием ансамблевых прогнозов погоды Европейского центра прогнозов на средние сроки.

В ряде работ исследовались возможности применения методов ансамблевого прогнозирования для долгосрочных прогнозов объёма речного стока с заблаговременностью от нескольких недель до нескольких месяцев). Первые работы в этой области были выполнены на примере двух горных речных бассейнов США. С помощью концептуальных моделей формирования стока с сосредоточенными параметрами по имеющимся метеорологическим наблюдениям рассчитывались показатели состояния водосбора к моменту выпуска прогноза, и затем по ансамблям погод за период заблаговременности прогноза, наблюдавшихся в предыдущие годы, рассчитывались возможные ансамбли гидрографов стока и вероятностные распределения прогнозируемого объёма стока. Такой подход обеспечил эффективный вероятностный прогноз объёма стока с заблаговременностью до месяца.

Для физико-географических условий РФ наибольшее значение имеют долгосрочные гидрологические прогнозы весеннего стока крупных равнинных рек, где заблаговременность прогноза может достигать 2–3 месяцев. В настоящее время такие прогнозы выпускаются в детерминистической форме на основе регрессионных связей объёма стока с запасами воды в снеге и индикаторами состояния почвогрунтов перед снеготаянием при предположении, что метеорологические условия за период заблаговременности прогноза близки к климатической норме. Использование этих прогнозов для пропуска весеннего половодья нередко приводит к значительным экономическим и экологическим ущербам, т. к. точность регрессионных связей в отдельные годы оказывается очень низкой.

В ИВП РАН проведены исследования возможностей повышения качества долгосрочных прогнозов весеннего стока с помощью физико-математических моделей формирования стока с распределёнными параметрами, включающих описание динамики переноса тепла и влаги в зимний и осенний период. Эти исследования показали, что использования таких моделей позволяет существенно улучшить точность и надёжность детерминистических расчётов весеннего стока по сравнению с расчётами на основе регрессионных связей. Далее разрабатывалась методика долгосрочных (с заблаговременностью 2–3 месяца) ансамблевых прогнозов объёмов и максимальных расходов весеннего стока, основанная на использовании физи-

ко-математической модели формирования стока и ансамблевого моделирования входных данных. Долгосрочные метеорологические прогнозы с заблаговременностью 2–3 месяца не выпускаются, однако в большинстве случаев объём весеннего стока определяется начальными условиями перед снеготаянием. Неопределённость, которую вносит отсутствие метеорологических данных за период заблаговременности прогноза, восполнялась ансамблями входных данных, состоящих из исторических суточных температур, осадков и влажности воздуха наблюдений за предыдущие годы, или ансамблями, полученными путём моделирования методом Монте-Карло из этих временных рядов.

С помощью физико-математических моделей формирования стока по имеющимся до момента выпуска прогнозов метеорологическим наблюдениям определялись показатели состояния водосбора прогноза и затем, по ансамблям погод, наблюдавшихся в предыдущие годы, рассчитывались возможные ансамбли гидрографов стока и вероятностные распределения прогнозируемого объёма стока. Однако наблюдавшиеся за период заблаговременности метеорологические ряды далеко не исчерпывают возможных сценариев погоды за этот период. Важно учесть не только наблюдавшиеся, но и возможные сценарии метеорологических воздействий на речной водосбор. Такие сценарии можно получить за счёт использования возможностей физико-математических моделей формирования стока в сочетании со стохастическими генераторами погоды и метода Монте-Карло. Помимо учёта неопределённости в задании метеорологических условий за период заблаговременности, в этом случае можно также оценивать неопределённость прогнозов, обусловленную различным пространственным распределением метеорологических величин и использованием разных предикторов и начальных условий.

В Институте водных проблем РАН проведены исследования возможностей применения различных методов ансамблевых прогнозов для долгосрочного прогнозирования весеннего стока на примере рек Сосна, Сейм и водосбора Чебоксарского водохранилища. Сравнены разные методы построения ансамблей метеорологических данных, улучшение статистических оценок оправдываемости прогнозов в сравнении с прогнозами, полученными с помощью рег-

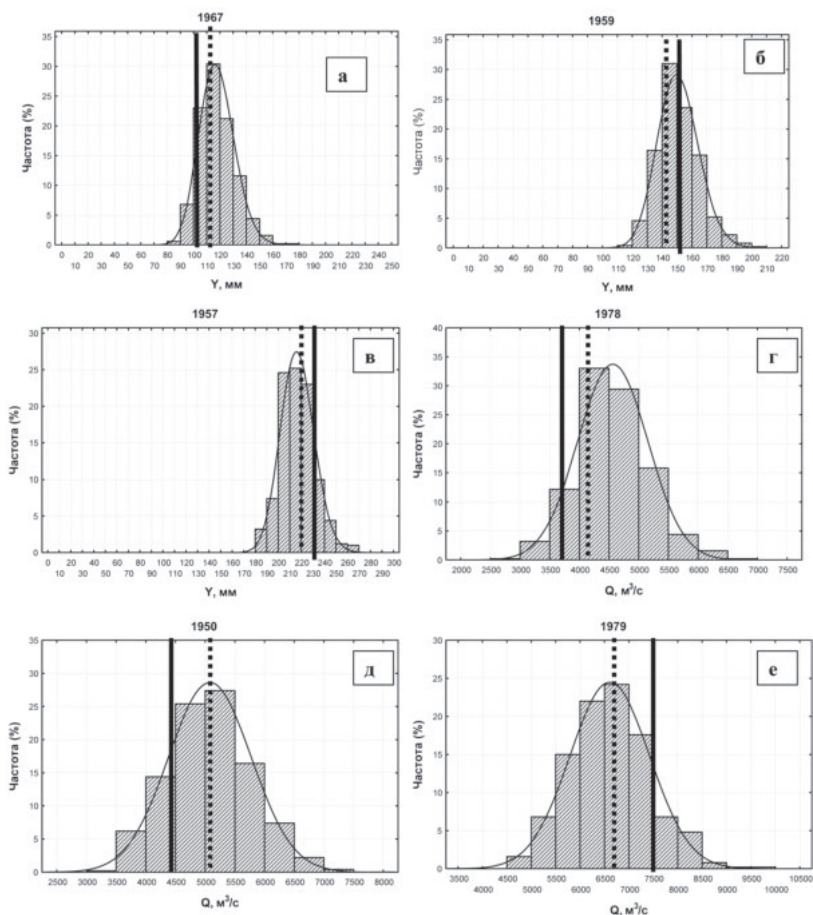


Рис. 1

рессионного отношения, разбросы «спагетти», необходимые длины статистических испытаний [9–13].

Общий вид вероятностного прогноза объёма стока весеннего половодья представлен на рис. 1.

Успешность краткосрочных гидрологических прогнозов в значительной степени зависит от точности задания начальных величин, которые характеризуют запасы воды в речном бассейне. Измерения этих величин, за исключением расходов воды, как правило, отсутствуют, и их обычно рассчитывают, начиная расчёты по прогности-

ческой модели за довольно длительное время до момента выпуска прогноза. При этом может происходить значительное накопление ошибок в характеристиках состояния гидрологической системы. При ансамблевых прогнозах появляется возможность уточнения начальных условий по мере поступления новой информации до момента выпуска прогноза. Уменьшение неопределённости исходной информации и улучшения качества вероятностных ансамблевых прогнозов может быть достигнуто путём оптимального совместного учёта ошибок, обусловленных несовершенством моделей, с ошибками измерений состояния гидрологической системы. Эта процедура, которую называют ассимиляцией данных наблюдений в модели, состоит из двух этапов: 1) количественной оценки ошибок гидрологической модели и измерений состояния гидрологической системы и 2) пошаговой корректировки характеристик состояния гидрологической модели с учётом соотношения ошибок модели и измерений гидрологической СИСТЕМЫ. Основные трудности ассимиляции данных связаны с количественной оценкой неопределённостей, связанных с различными процессами формирования стока и разными гидрологическими моделями, а также подбором стохастических моделей для описания и моделирования этих неопределённостей. Однако общие подходы для таких оценок недостаточно разработаны и в основном для этого используются эмпирические методы, выбор которых зависит от выбранной прогностической модели. Количественная оценка неопределённости значительно упрощается, если используются упрощённые физически обоснованные гидрологические модели, в которых параметры модели имеют ясный физический смысл.

Из различных процедур ассимиляции данных в последние годы для гидрологических прогнозов стал чаще всего применяться ансамблевый фильтр Калмана [13, 14]. Разработка методики непрерывных ансамблевых краткосрочных прогнозов на основе ансамблевого фильтра Калмана проводилась нами с помощью физико-математической модели тало-дождевого стока р. Дон до г. Лиски [15, 16]. Используемая модель основана на конечно-элементной схематизации водосборной площади. В качестве характеристик состояния гидрологической системы для организации непрерывных ансамблевых краткосрочных прогнозов использовались запасы влаги и

льдистость верхнего метрового слоя почвы на лесных и полевых участках.

В выбранной версии ансамблевого фильтра Калмана для обновления характеристик состояния гидрологической системы реализуются два последовательных этапа для каждого члена ансамбля. На первом этапе выполняется предсказание состояния динамической системы на момент времени t по результатам расчётов по модели формирования стока

$$x_t = F(x_{t-1}, u_{t-1}, w_{t-1}), \quad (1)$$

где x_{t-1} – вектор состояния системы в момент времени $t-1$, u_{t-1} – вектор внешнего воздействия (осадки, температура и влажность воздуха), w_{t-1} – ошибка модели и источники неопределённости, F – система уравнений модели, определяющая переход состояния системы от момента времени $t-1$ к t .

По результатам расчётов всех N ансамблей строится ковариационная матрица ошибок P_t

$$P_t = \frac{1}{N-1} E_t E_t^T, \quad (2)$$

где

$$E_t = (x_t^1 - \bar{x}_t, x_t^2 - \bar{x}_t, \dots, x_t^N - \bar{x}_t), \quad (3)$$

$$\bar{x}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_t^i, \quad (4)$$

$$x_t = (x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^N). \quad (5)$$

На втором этапе осуществляется корректировка полученных результатов по предварительной оценке характеристик состояния системы. Коэффициент корректировки Калмана K_t находится как

$$K_t = P_t H_t^T (H_t P_t H_t^T + R_t)^{-1}, \quad (6)$$

где величина $P_t H_t^T$ аппроксимируется ковариацией между характеристиками состояния системы и прогнозируемыми расходами [5]

$$P_t H_t^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_t^i - \bar{x}_t) (H(x_t^i) - \bar{H}(x_t))^T, \quad (7)$$

а величина $H_t P_t H_t^T$ аппроксимируется ковариацией прогнозируемых расходов

$$H_t P_t H_t^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H(x_t^i) - \bar{H}(x_t)) (H(x_t^i) - \bar{H}(x_t))^T, \quad (8)$$

где

$$\bar{H}(x_t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(x_t^i). \quad (9)$$

Матрица характеристик состояния системы X_t^+ обновляется на каждом временном шаге в виде

$$X_t^+ = X_t + K_t(Q_t^i - H(x_t^i)), \quad (10)$$

где Q_t^i – измеренные расходы воды на момент времени t . В классическом ансамблевом методе фильтра Калмана измеренные расходы также подвергаются пертурбации для представления неопределённости.

Средние значения запасов влаги и льдистости на лесных и полевых участках задавались по результатам предварительных расчётов на модели формирования стока, до момента начала выпуска непрерывных прогнозов стока в выходном створе. Начальные значения характеристик состояния представлялись в виде ансамбля, использующего нормальные распределения характеристик состояния с нулевым средним и средней квадратической ошибкой равной доле (в процентах) от средней величины.

Ошибки в рассчитанных величинах поступлений талых и дождевых вод и измерениях расходов воды предполагались распределёнными по нормальному закону с нулевым средним и средней квадратической ошибкой, равной заданной доле, рассчитанной по модели величины поступления и от измеренного расхода.

Средняя квадратическая ошибка рассчитанного поступления талых и дождевых вод на водосбор изменялась от 10 до 40% от нормы. Ошибки измерения расходов воды в створе р. Дон у г. Лиски принимались равными от 10 до 30% средней величины. Характеристики состояния гидрологической системы на начало расчёта половодья менялись от 3 до 10% нормы. Ошибки в поступлении талых и дождевых вод и ошибки в измерениях расходов воды в выходном створе моделировались методом Монте – Карло.

Эффективность прогнозов оценивалась близостью спрогнозированных расходов воды с данными измерений расходов воды р. Дон у г. Лиски. В качестве иллюстрации проведённых расчётов на рис. 2 показаны результаты прогнозов расходов воды р. Дон у г. Лиски с заблаговременностью 4 суток с использованием обновлённых данных о характеристиках состояния гидрологической системы на каждый день выпуска прогноза. Затемнённая область на графиках представляет «спагетти» прогнозов, полученное за счёт включения неопределённостей во внешнем воздействии и ошибок в измеренных

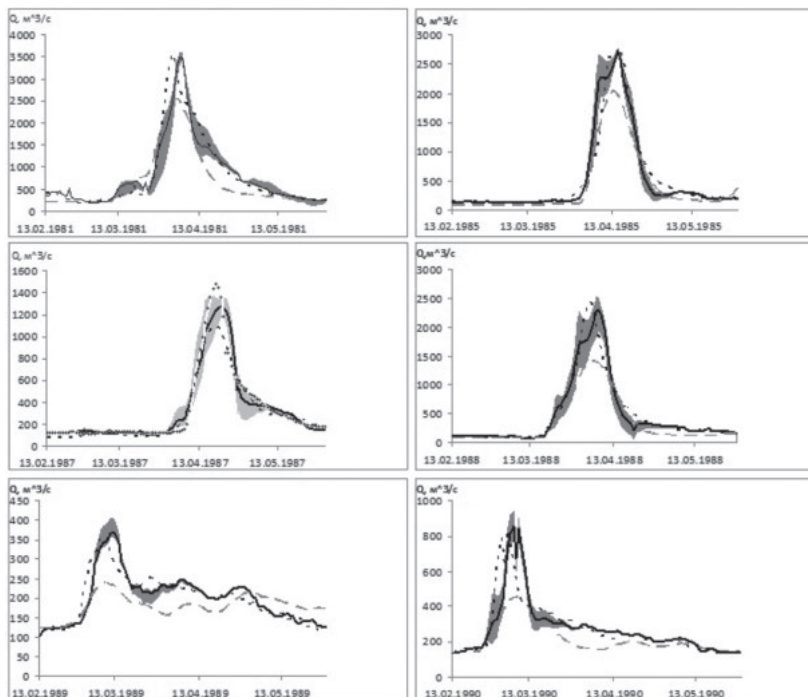


Рис. 2

расходах при использовании ассимиляции измеренных расходов воды методом ансамблевого фильтра Калмана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление) (2008) Москва, ИЗД. ИВП РАН., 394 p.
2. Dawson and. Wilby Hydrological modelling using artificial neural networks. Progress in Physical Geography 25,1 (2001) pp. 80–108 C.
3. Krzysztofowicz R. Bayesian system for probabilistic river stage forecasting // J. of Hydrol. 2002. 268 (1–4). P. 16–40.
4. Cloke, H.L., Pappenberger, F., 2009. Ensemble flood forecasting: A review. J. Hydrol. doi:10.1016.
5. Schaake J.C, Hamill T.M, Buizza R, Clark M. HEPEx: the Hydrological Ensemble Prediction Experiment. Bulletin of the American Meteorological Society 88(10): 2008. P. 1541–1547.
6. Renner M., Werner M.G.F., Rademacher S., Sprokkereef E. Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine. Journal of Hydrology, 2009. V. 376. P. 463–475.

7. Boulin, E., Vannitsem, S., Skill of medium-range hydrological ensemble predictions. *Journal of Hydrometeorology*, 2005. V. 6 (5), P. 729–744.

8. Boucher M.-A., F. Anctil, L. Perreault, and D. Tremblay. 2011 A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context. *Advances in Geosciences*. 29, 85–94.

9. Кучмент Л.С., Методические основы ансамблевых гидрологических прогнозов Водное хозяйство России №3, 2014. с. 5–16.

10. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // *Метеорология и гидрология*. 2007. №2. С. 83–95.

11. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока. // *Метеорология и гидрология*. 2008. №12. С. 81–94.

12. Gelfan, A. N., Motovilov, Yu. G., and Moreido, V. M.: Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir, *Proc. IAHS*, 369, P. 115–120, doi:10.5194/piahs-369-115-2015, 2015.

13. Rakovec, O., Weerts, A.H., Hazenberg, P., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., 2012. Stateupdating of a distributed hydrological model with ensemble Kalman filtering: effects of updating frequency and observation network density on forecast accuracy. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (9), 3435–3449.

14. Liu Y. et al. Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3863–3887, 2012, 3863–3887

15. Демидов В.Н. Физико-математическая модель формирования талого стока равнинной реки (на примере р. Дон). Сб. научных трудов «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» Петрозаводск, 2015, с. 134–142

16. Kuchment L.S., Demidov V.N. The new paradigm in hydrological forecasting (ensemble predictions and their improving based on assimilation of observation data). Труды Международной научно-практической конференции «Водный форум БРИКС», Москва, 2016

Проблемы изучения и моделирования взаимодействия поверхности суши с атмосферой

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: гранты №14-17-00700 (общий обзор LSM-моделей) и №16-17-10039 (обзор результатов, полученных на основе LSM-модели SWAP)

Е.М. Гусев, О.Н. Насонова

Введение

В соответствии с интенсивностью развития тех или иных областей научного знания, 18 в. иногда называют веком И. Ньютона, 19 в. – веком Ч. Дарвина, а 20 в. – веком В.И. Вернадского, разработавшего учение о биосфере – специфической оболочке планеты, организованной жизнью. Именно в 20 в. началось бурное развитие различных наук о биосфере Земли, продолжающееся и поныне. А громадный прогресс в области прикладной математики и вычислительных средств, развитие универсального для многих исследователей языка физико-математического моделирования привели к тому, что тезис Вернадского о единстве и взаимосвязи природы нашёл своё отражение во взаимосвязи и взаимопроникновении наук, приведшим к комплексному математическому описанию основных биосферных процессов. К последним следует отнести прежде всего глобальные циркуляции различных субстанций, формирующиеся под воздействием солнечной энергии. Возникновение на планете подобных циркуляций неизбежно, поскольку, согласно [19], при постоянном действии потока свободной энергии на ограниченную (по объёму и количеству вещества) систему, каковой можно считать и Землю, её единственной структуроформирующей реакцией может быть лишь организация собственного потока энергии, нейтрализующего на основе круговорота вещества внешнее энергетическое воздействие. Таким образом, поступающая на Землю энергия солнечного излучения приводит в движение все круговороты планеты, из которых наиболее интенсивными являются процессы атмосферной циркуляции, гидрологического цикла, а также «жизнь», которую, согласно Онсагеру и Моровицу [5], можно определить как «сопряжённую циркуляцию биоэлементов», поскольку жизнь в её современной форме не может существовать вне биотического круговорота.

При этом следует отметить, что на суше трансформация потоков солнечной радиации в другие формы энергии происходит в очень тонком планетарном слое, практически на границе между атмосферой и литосферой. Именно здесь сопрягаются все четыре составляющие биосферы: атмосфера, верхняя часть литосферы, гидросфера и живое вещество суши. Толщина этого слоя, названного Вернадским «плёнкой жизни», очень незначительна: он не поднимается выше нескольких десятков метров над земной поверхностью и не опускается ниже её более, чем на несколько метров [1]. Однако, эта «плёнка жизни», или как её принято называть в климатологии, метеорологии и гидрологии, система «почва – растительный (и/или снежный) покров – приземный слой атмосферы» (в международной научной литературе для идентификации данной системы существует устоявшаяся аббревиатура SVAS (Soil – Vegetation – Atmosphere System), которую мы и будем использовать в последующем изложении), играет особую роль в формировании климатических, гидрологических и биотических процессов. Эта роль состоит в том, что SVAS является «точкой сопряжения» трёх упомянутых выше глобальных диссипативных структур: циркуляции атмосферы, гидрологического цикла суши и круговорота биоэлементов наземных экосистем. При этом необходимо отметить два немаловажных обстоятельства. Во-первых, поскольку приводящая в движение эти структуры энергия солнечного излучения трансформируется в другие формы энергии в этой же «точке», то фактически именно здесь определяются и контролируются как интенсивность, так и характер временной динамики указанных диссипативных структур. Во-вторых, все три структуры взаимосвязаны и взаимозависимы. В силу этого все более возрастает потребность комплексного изучения и адекватного описания «физики» процессов тепло- и влагообмена, происходящих в SVAS.

Конечной формой систематизации научного знания об изучаемом объекте является его количественное описание, т.е. математическая модель. Качество решения указанной проблемы определяется, во-первых, качеством систематизации знаний, полученных в области гидрологии суши, физики атмосферы, почвоведения, физиологии растений и т.п., в виде физико-математических моделей, воспроизводящих процессы взаимодействия суши с атмосфе-

рой в региональном и глобальном масштабах, во-вторых, надёжностью информационного обеспечения этих моделей. К подобным моделям можно отнести получившие широкое распространение LSM-модели (Land Surface Models) [3, 8, 18].

Современное состояние в области изучения и моделирования процессов тепло- и влагообмена на основе LSM -моделей

Рассмотренные выше обстоятельства привели к тому, что на современном этапе развития наук о Земле задачи понимания и математического моделирования физического (а зачастую и биофизического) механизма процессов, происходящих в SVAS, стали актуальными для целого ряда специалистов: климатологов, метеорологов, физиков атмосферы, гидрологов, почвоведов, геокриологов, физиологов растений, экологов, а также специалистов по сельскому и лесному хозяйству, формированию и управлению водными ресурсами и т.д. Усилия исследователей самого широкого профиля направлены на проверку и улучшение геофизических моделей, в частности LSM-моделей, на региональном и глобальном уровнях, а также на применение этих моделей для сценарного прогнозирования последствий возможных климатических изменений в разных регионах планеты.

Указанные задачи нашли свое отражение в организации целого ряда международных программ и проектов, связанных с комплексным исследованием и моделированием тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой, в частности, таких как Global Energy and Water cycle EXperiment (GEWEX), Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC), Global Soil Wetness Project (GSWP), Global Land/Atmosphere System Study (GLASS), Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes (PILPS), Snow Model Intercomparison Project (SnowMIP), Rhone AGGregation experiment (Rhone-AGG), MOdel Parameters estimation EXperiment (MOPEX), African Monsoon Multi-disciplinary Analysis Land surface Model Intercomparison Project (ALMIP), Snow Model Intercomparison Project (SnowMIP), Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) и т.д., в постоянном включении в повестку международных конференций и симпозиумов, посвящённых самым разнообразным проблемам в области наук о Земле, тематики, связанной с LSMs. В проведении комплексных полевых экспериментов участвуют в

настоящее время обычно несколько десятков научно-исследовательских организаций самого разного профиля, осуществляющих как наземные, так и дистанционные измерения параметров системы SVAS и динамики её характеристик. Примером могут служить многочисленные международные и национальные крупномасштабные полевые эксперименты «Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment» (HAPEX-Sahel) в Сахели, First International land surface climatology Field Experiment (FIFE) в США, KURsk land-surface EXperiment (KUREX-89 и KUREX-91) в России, Southern Great Plains hydrology experiment (SGP97) в США и др. На основе международной кооперации создаются сети непрерывного специализированного мониторинга за характеристиками SVAS с высокой временной разрешающей способностью (FLUXNET, EURONET и др.).

Информация о различных характеристиках SVAS, накопленная международным научным сообществом, а также непрерывно получаемая в ходе выполнения текущих проектов и экспериментов, систематизируется в виде многочисленных электронных баз данных (например, комплексная база данных International Satellite Land-Surface Climatology Project (ISLSCP), Water and Global Change (WATCH), ECOCLIMAP), которые могут использоваться для задания значений параметров подстилающей поверхности в LSM-моделях.

Обычно перед исследователями, занимающимися разработкой LSM-моделей, возникают две большие задачи. Первая заключается в построении физически адекватной модели в локальном масштабе (на уровне небольшого достаточно однородного по параметрам и действующим внешним факторам участка суши). Вторая задача связана с переходом от модели локального масштаба к моделированию процессов в мезо- и макромасштабе (иногда такой переход называют регионализацией или апскейлингом), т.е. в масштабе достаточно протяжённой неоднородной территории суши (области, региона, речного бассейна, континента и т.п.).

Постановка этой задачи вызвана необходимостью иметь достаточно адекватное модельное воспроизведение физического механизма процессов, который наиболее просто изучать и моделировать на объектах малых масштабов в силу относительной однородности их параметров и влияющих факторов.

Постановка второй задачи обусловлена тем обстоятельством, что практически все основные биосферные объекты планеты являются продуктом самоорганизации биосферы под воздействием свободной энергии, порождающей диссипативные структуры, образование которых приводит к появлению в изначальном хаосе «островков упорядоченности», т.е. к значительной мозаичности природных объектов. В силу этого при увеличении масштабов исследуемого объекта неизбежно возникает целый ряд нерешённых задач, связанных с его неоднородностью и касающихся регионализации как самих процессов, происходящих в системе SVAS, так и параметров SVAS (геоморфологических, почвенных, растительного покрова), а также влияющих внешних факторов (например, осадков).

В методологических подходах к решению проблемы регионализации воспроизводимых LSM-моделями процессов, по-видимому, можно выделить три направления. Первое связано с применением к описанию процессов, происходящих в региональном масштабе, «точечных» (описывающих процессы на локальном уровне) физико-математических моделей. При этом средние по площади значения тех или иных выходных характеристик LSMs рассчитываются с использованием в моделях так называемых «эффективных» значений входных факторов и параметров системы [3].

Второе направление отличается учётом пространственной неоднородности объекта в явном виде. Оно предполагает представление рассматриваемого объекта в виде мозаичной совокупности однородных участков с различными, но детерминировано определёнными значениями соответствующих входных данных и получение совокупности решений для каждого участка [3].

Третье направление, статистическое, предполагает представление объекта в виде ансамбля участков, для которых входные характеристики являются случайными величинами с известными статистическими параметрами [3]. В этом случае задача сводится к аналитическому или численному решению уравнений, описывающих динамику не самих выходных характеристик, а их функций распределения или статистических моментов.

Можно отметить, что при описанной стратегии построения LSMs-моделей, последние представляют собой начальный, упрощённый этап в развитии моделей биосферы, которое начинается с

объектов относительно малых пространственных масштабов (типа биогеоценозов), но с достаточно большей детализацией процессов внутри LSMs, в отличие от моделей биогеохимических процессов, биогеографических или динамических глобальных моделей растительного покрова, также претендующих на подходы к описанию биосферы, но идущих к этому описанию как бы «сверху», т.е. с позиций объектов больших пространственных масштабов.

К настоящему времени можно считать, что физическая основа LSM-моделей достаточно хорошо параметризована, т.е. математическое описание геофизических, гидрологических и даже биофизических процессов алгоритмизировано достаточно адекватно. Тем не менее, одной из важнейших задач продолжает оставаться уточнение и повышение качества параметризаций указанных процессов, которое будет продолжаться и в дальнейшем, повышая при этом и качество самих LSM-моделей.

Поскольку число рассматриваемых в LSMs процессов велико, а варианты их параметризаций многообразны, количество существующих на сегодняшний день LSM моделей исчисляется десятками (если не сотнями). Поэтому дать полный обзор этих моделей в рамках одной статьи не представляется возможным. Отметим лишь, следуя классификации моделей, приведённой в [23], что они изменяются от схем типа «bucket» («ведро»), ориентированных на простоту описания и чаще всего игнорирующих растительность, до сложных микрометеорологических моделей, претендующих на максимальную детализацию объекта исследований и включающих множество параметров подстилающей поверхности, предназначенных для описания почвогрунтов, растительного и снежного покровов [9, 22]. Помимо этого существует большая группа так называемых промежуточных моделей, которые, занимая нишу между двумя вышеуказанными типами, пытаются найти разумный компромисс между адекватностью и простотой описания физических процессов (LAND [4], SPONSOR [6], ISBA [21], CLASS [25], ECMWF [17], SWAP [3, 13, 14] и др.).

Ещё одной важнейшей задачей является информационное обеспечение моделей, которое можно разделить на две части. Первая связана с идентификацией рассматриваемого объекта (речного бассейна, водосбора, полевой или лесной площадки, региона и т.д.),

обеспечиваемой заданием параметров его подстилающей поверхности (характеристик растительного покрова, параметров почвы, геоморфологических показателей, характеристик речной сети и т.д.), т.е. достаточно консервативных параметров, определяющих указанный объект. Параметры почвы и растительности могут быть либо измерены непосредственно, либо получены на основе других измеренных характеристик, либо оценены приближённо по имеющимся в литературе таблицам с использованием информации о типах почвы и растительности. Альтернативой этому могут служить глобальные базы данных по параметрам подстилающей поверхности с различным пространственным разрешением.

Информационное обеспечение по параметрам подстилающей поверхности, взятым из глобальных баз данных (ISLSCP-II, ECOCLIMAP-2; HWSD: Harmonized World Soil Database, STATSGO и др.), разнородно по точности, надёжности и достоверности в отношении различных групп данных и районов земного шара. Это обусловлено разным качеством или отсутствием соответствующих данных измерений, различиями в методиках получения недостающих данных, а также необходимостью перехода от точечных измерений соответствующих характеристик к их площадным оценкам, которые были бы репрезентативными для обширных территорий.

Тем не менее, тип информационного обеспечения, основанный на глобальных базах данных, весьма привлекателен для модельеров, поскольку избавляет их от трудоёмкого этапа подготовки информации для моделей.

Вторую часть информационного обеспечения определяют метеорологические характеристики, поскольку они обеспечивают информацию о верхнем граничном условии гидрологической системы. В международной литературе они имеют термин «forcing», т.е. вынуждающая сила, поскольку именно эта «сила», в первую очередь, солнечное излучение и другие составляющие энергетического баланса, «раскручивает» гидрологический цикл. Фактически мы имеем тепловую машину, в которой рабочим телом является вода. Поэтому динамика метеорологических характеристик является очень важным информационным блоком. Во многом именно они определяют разделение выпадающих осадков на три ветви гидрологического цикла, возвращающие воду в атмосферу:

поверхностную и подземную составляющие стока и суммарное испарение.

Информация о приземных значениях метеорологических характеристик (включающих температуру и влажность воздуха, атмосферные осадки и давление, приходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, скорость ветра) может быть получена на основе данных измерений (что обычно и делалось раньше). Однако эти данные могут иметь значительные погрешности, обусловленные различными методиками их измерения; точечным характером измерений, приводящим к использованию различных методов пространственной интерполяции или же осреднения полученных данных по территории исследуемого объекта; редкой сетью измерений; неверной трактовкой данных измерений (особенно для зимних осадков в высоких широтах, когда образуются так называемые ложные осадки) и т.д. Кроме того, использование измеренных метеорологических данных для решения с помощью LSMs прогностических задач невозможно, потому что таких данных для будущих десятилетий и столетий просто нет.

Поэтому в настоящее время и для этой части информационного обеспечения часто применяется альтернативный подход, основанный на использовании глобальных баз метеорологических данных, рассчитанных с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАиО) или полученных в результате реанализа (NCEP/DOE, ERA-40 и др.). Последние используются для исторического периода, первые помимо этого могут применяться и для решения прогностических задач при задании социально-экономических сценариев развития человеческой цивилизации.

В последние годы международное научное сообщество большое внимание уделяет задачам, связанным с оценкой неопределённости расчётов составляющих водного баланса исследуемых бассейнов, в частности, речного стока, обладающего естественной изменчивостью (как в масштабах суток, так и многих лет). Данная изменчивость, как показано в [10, 15], обусловлена хаотическим характером атмосферных процессов (так называемым погодным шумом), их неустойчивостью по отношению даже к малым отклонениям в начальных условиях при дальнейшей эволюции метеорологических характеристик. Этот факт подтверждают и расчёты динамики метеорологических характеристик МОЦАиО [23].

Формирование речного стока и его естественной неопределённости в рамках конкретного бассейна происходит под влиянием вынуждающей силы (forcing), в качестве которой выступают атмосферные процессы, указанная неустойчивость характеристик которых приводит к неустойчивости и значений речного стока. Причиной появления атмосферного хаоса является объективная неустойчивость по отношению к начальным условиям: малое изменение начального условия со временем приводит к достаточно большим изменениям динамики системы. Для нелинейной системы с диссипацией невозможно предсказать конкретный ход её развития, поскольку начальные условия состояния атмосферы никогда не могут быть заданы с абсолютной точностью. Таким образом погодный шум атмосферных процессов приводит к такому же погодному шуму гидрологических процессов.

Оценка масштаба естественной неопределённости характеристик гидрологического режима представляет собой нижнюю грань (инфинум) неопределённости, с которой мы могли бы предсказывать геофизическую характеристику X (в данном случае значение речного стока), если бы не было изменения внешних воздействий, влияющих на него (в частности, изменения климата или антропогенной деятельности). В качестве меры естественной неопределённости Un той или иной положительно определённой геофизической характеристики (в настоящей работе стока), имеющей случайную составляющую, использован следующий показатель:

$$Un = (x_{0,975} - x_{0,025}) / M(X), \quad (1)$$

где $x_{0,975}$ и $-x_{0,025}$ – квантили 97,5 %-ой и 2,5 %-ой обеспеченности величины X , $M(X)$ – её математическое ожидание. Указанная характеристика представляет собой отношение диапазона, в который может с 95%-й обеспеченностью попасть случайная величина, к её среднему значению. Саму же разность $Un_{abc} = x_{0,975} - x_{0,025}$ назовём абсолютной неопределённостью величины X .

Возможные подходы к решению указанных в данном разделе задач рассмотрим на примере работы LSM-модели SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants), разработанной в Лаборатории физики почвенных вод ИВП РАН.

LSM-модель SWAP

Модель SWAP, разрабатываемая авторами статьи с середины 1990-х гг., представляет собой физико-математическую модель, относящуюся к промежуточному по сложности классу LSM-моделей и описывающую процессы теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой. Отличительная особенность модели SWAP – сочетание её достаточной физической обоснованности и рациональности с точки зрения используемых модельных средств. При этом рациональность обусловлена применением преимущественно аналитических методов решения систем уравнений (в то время как в большинстве существующих моделей используются численные методы) и стремлением к сокращению по мере возможности числа параметров модели.

Входными данными для модели SWAP являются значения метеорологических элементов и параметров подстилающей поверхности, выходными – все составляющие водного и теплового балансов рассматриваемого объекта, а также различные характеристики его теплового и водного режимов (в отличие от чисто гидрологических моделей, предназначенных, как правило, лишь для расчета речного стока). Использование в соответствии с традиционным гидрологическим подходом методов оптимизации для калибровки наиболее важных параметров подстилающей поверхности по данным измерений речного стока за несколько лет позволяет уточнить значения этих параметров и соответственно повысить точность проводимых расчётов.

Используя указанное выше информационное обеспечение, основанное как на данных наблюдений метеорологических станций, так и на глобальных базах данных, а также схематизированное представление исследуемых объектов в виде соединённых речной сетью расчетных ячеек с различным пространственным разрешением, программа SWAP позволяет моделировать гидрологические процессы (включая составляющие водного баланса), а также формирование вертикальных потоков радиации, суммарного испарения, турбулентного теплообмена суши с атмосферой, потоков углекислого газа и динамику других гидрологических и геофизических характеристик речных бассейнов [2, 3].

Иллюстрация результатов работы модели SWAP

Важная стадия разработки модели, связанная с первой из указанных выше задач (получение достаточно адекватного воспроизведения природных процессов), – её проверка на конкретных геофизических объектах (естественных и сельскохозяйственных экосистемах, водосборах, речных бассейнах) на основе сопоставления результатов модельных расчетов с данными наблюдений. Указанная проверка осуществлялась на многочисленных объектах (экспериментальных площадках, малых водосборах, крупных речных бассейнах, а также в масштабах всего Земного шара) как самими авторами, так и на основе их участия в указанных выше международных проектах. Здесь мы приведем лишь несколько примеров такой проверки.

Воспроизведение моделью SWAP элементов гидрологического цикла в бассейне р. Роны

В основе данного исследования – результаты, полученные 15 моделями разных стран в ходе выполнения международного проекта Rhone-AGG по сравнению LSM-моделей [8], выполняемого в рамках экспериментов GEWEX/GLASS всемирной программы по исследованию климата (World Climate Research Programme – WCRP). Цель проекта Rhone-AGG состояла, во-первых, в исследовании способности современных LSM-моделей воспроизводить различные составляющие водного баланса за четырехлетний период (1985–1989 гг.) для экспериментального бассейна р. Роны площадью 86996 км², отличающегося большим многообразием природных условий; во-вторых, в исследовании влияния пространственной дискретизации бассейна на результаты расчетов.

Как оказалось, статистические характеристики точности расчета высоты снежного покрова различными LSM-моделями, полученные по данным, опубликованным в [8] (рис. 1), показывают, что среднеквадратическая ошибка расчетов *RMSD* варьирует по моделям от 0,269 до 0,865 м (составляя в среднем 0,425), квадрат коэффициента корреляции R^2 – от 0,087 до 0,74 (в среднем 0,608). При этом наилучшие значения *RMSD* и R^2 получились у модели SWAP. Систематическая ошибка *Bias* свидетельствует о том, что большинство моделей недооценивают высоту снега в Альпах (максимально на 0,63 м

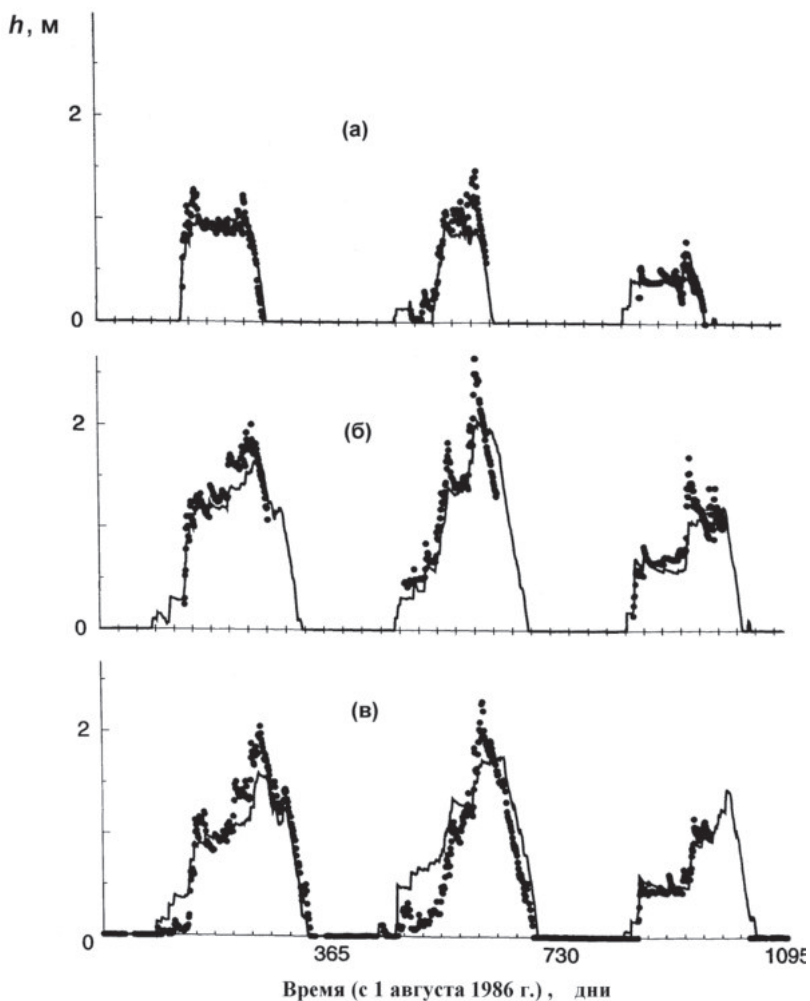


Рис. 1. Динамика измеренных (точки) и смоделированных с помощью модели SWAP (линии) значений высоты снежного покрова h на площадках Пралоньян, Тинь, Нивуаз ле Рошейес (а – в соответственно) во французских Альпах (1986–89 гг.) [8]

при том, что высота снега может достигать 2–3 м). У модели SWAP $Bias$ пренебрежимо мал (0,016 м). Таким образом, из всех участвовавших моделей SWAP показала лучшие результаты по моделированию динамики высоты снега в Альпах.

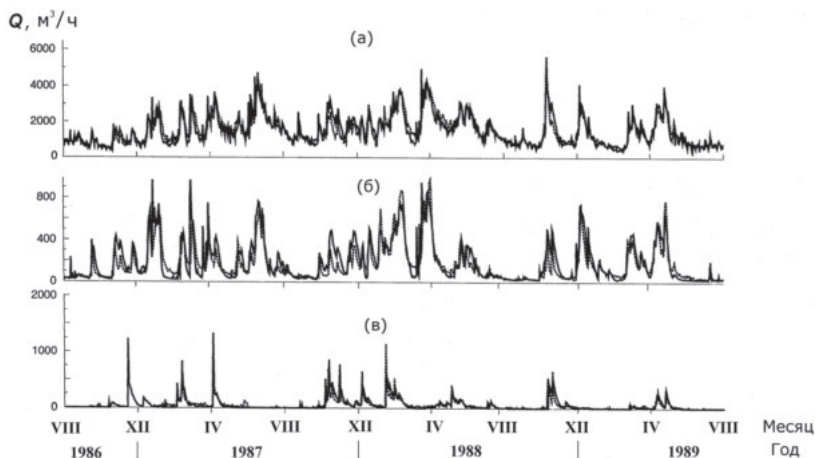


Рис. 2. Динамика измеренных (точки) и рассчитанных на основе модели SWAP (кривые) расходов воды для р. Роны, а также для ее притоков Соны и Ардеш (а – соответственно) [8].

Динамика суточных расходов измеренного и рассчитанного стока за 3 года для бассейна Роны и её притоков – рек Соны и Ардеш (рис. 2) в целом показала, что SWAP хорошо воспроизводит и эту характеристику. Коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными суточными значениями стока Роны равен 0,91. Общий объём её рассчитанного стока близок к измеренному (отношение объёма рассчитанного стока к измеренному равно 0,998) По способности воспроизводить речной сток в бассейне р. Роны модель SWAP оказалась на втором (из 15) месте после модели ISBA [8], разработанной организаторами проекта Rhone-AGG – сотрудниками Meteo-France.

Воспроизведение моделью SWAP элементов гидрологического цикла в районе Западной Африки

Процессы на поверхности суши играют важную роль в формировании изменчивости муссонов в Западной Африке, особенно в странах Сахеля. Этот регион характеризуется сильной чувствительностью к влажности почвы и большой временной изменчивостью испарения, в связи с чем может считаться горячей точкой планеты во взаимодействии подстилающей поверхности суши с атмосферой.

В рамках указанного выше проекта ALMIP2 была проведена оценка способности воспроизведения двадцатью моделями, разработанными научными коллективами разных стран, водных потоков на основе сопоставления результатов модельных расчётов составляющих водного баланса за 2006–08 гг. с данными измерений на водосборе озера Агоуфоу в области Гурма в Мали. Динамика стока в озеро оценивалась на основе измерений высоты и площади поверхности озера, полученных с помощью дистанционного зондирования [12]. Испарение с водосбора оценивалось также дистанционно на 17 измерительных площадках.

На рис. 3 показано сопоставление рассчитанных разными моделями средних за указанный период объёмов стока с его измеренным значением. Видно, что наилучшие результаты показала модель SWAP. Кроме того, здесь также приведена динамика суммарного испарения за 2007 г. для экспериментальной площадки №17 водосбора озера Агоуфоу, показывающая удовлетворительное согласие измеренных данных и рассчитанных на основе модели SWAP.

Ещё одним объектом исследования в рамках ALMIP2 являлась верхняя часть бассейна р. Веме, расположенного в Северном Бенине, площадью ~14400 км² [11]. Наблюдённые метеорологические характеристики, необходимые для проведения модельных расчётов, были интерполированы по территории бассейна. В частности, распределение осадков по расчётным ячейкам осуществлялось на основе операции кригинга.

Статистика соответствия воспроизведённых разными LSM-моделями и измеренных суточных расходов стока верхней части бассейна р. Веме представлена на рис. 4. Она показывает, что в соответствии с полученными значениями нормализованной среднеквадратической ошибки расчёта стока *NRMSE* и эффективности расчёта по Нэшу-Сатклифу *NS* модель SWAP оказалась на втором месте среди всех моделей.

Как приведённые выше сопоставления воспроизводимых моделью SWAP характеристик гидрологического режима речных бассейнов, так и другие многочисленные её проверки, проведенные для разных по масштабам объектов, находящихся в самых различных природных условиях, показали, что модель SWAP может быть использована для решения различных гидрологических и водохо-

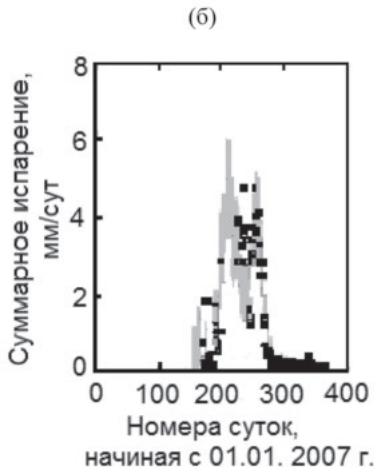
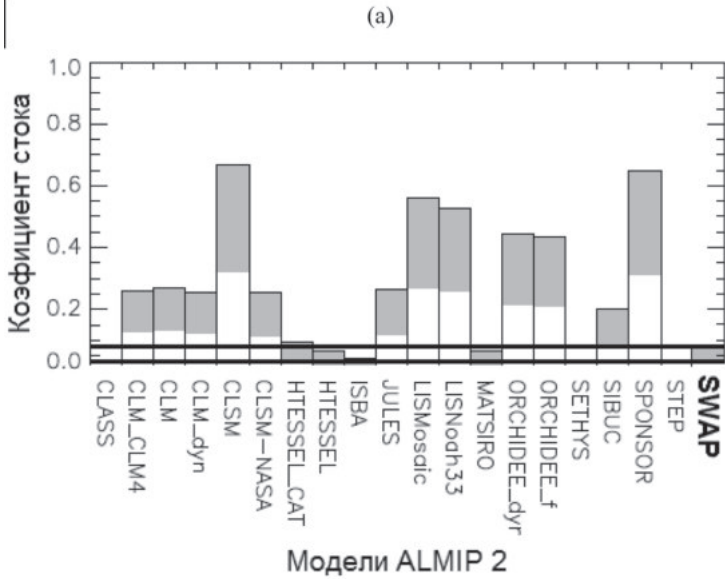


Рис. 3. Сопоставление гидрологических характеристик, рассчитанных в рамках проекта ALMIP-2, с данными наблюдений [12].

(а) – Диапазон коэффициентов годового стока, рассчитанных на основе разных моделей ALMIP-2 за период 2006 – 2008 гг. (серые прямоугольники) по сравнению с диапазоном измеренных коэффициентов стока для водосбора озера Агоуфу за тот же период (границы диапазона показаны горизонтальными жирными линиями).

(б) – Суточное суммарное испарение, рассчитанное на основе модели SWAP (серая линия) и измеренное дистанционным методом (черные квадраты) для 2007 г. на измерительной площадке №17 водосбора озера Агоуфу.

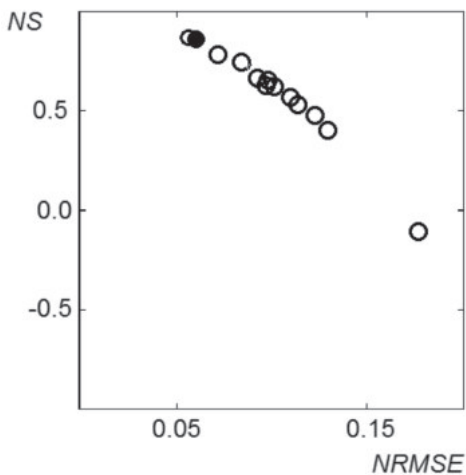


Рис. 4. Статистика соответствия воспроизведенных 14-ю разными LSM-моделями проекта ALMIP-2 и измеренных суточных расходов стока верхней части бассейна р. Веме [11]. Черный кружок соответствует результатам модели SWAP, пустые кружки – остальным участвовавшим в данном эксперименте 13 моделям

зайственных задач, в частности, задач прогнозирования изменения гидрологического режима речных бассейнов при возможных изменениях климата.

Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса в северных речных бассейнах в связи с возможным изменением климата

Поступление пресной воды в Северный Ледовитый океан в виде речного стока с дренажной территории пан-Арктического бассейна составляет примерно 50% от её суммарного поступления [7]. Для других океанов это соотношение гораздо ниже, поскольку среди приходных составляющих пресных вод, как правило, доминируют осадки, выпадающие на поверхность океанов. В то же время результаты использования климатических моделей в целом свидетельствуют о том, что прогнозируемое глобальное потепление в наибольшей степени будет сказываться именно на высоких северных широтах, приводя к увеличению в этой зоне осадков и усилению снеготаяния. Вызванные этими факторами изменения гидрологического режима территории пан-Арктического бассейна могут оказать значительное влияние как на водно-солевой баланс самого Арктического бассейна, так и на водный баланс его дренажной территории, что отразится на функционировании экосистем данного региона. Тем не менее, вопрос о том, как глобальное потепление

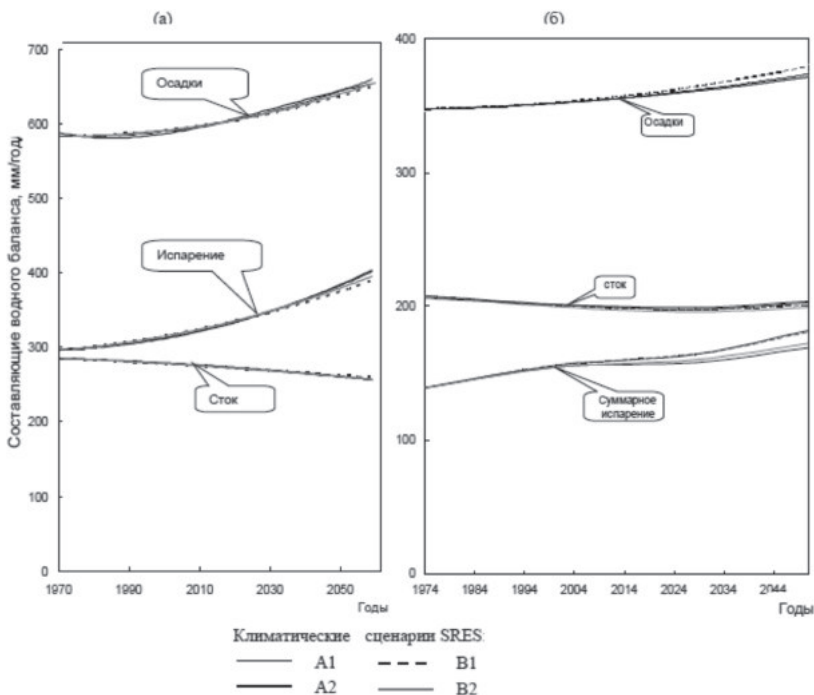


Рис. 5. Эволюция в конце XX в. и первой половине XXI в. годовых сумм осадков, стока и суммарного испарения, рассчитанных по модели SWAP в соответствии с семейством климатических сценариев SRES: A1 (1), A2 (2), B1 (3) и B2 (4) и средних для бассейнов рек Северной Двины (а) и Лены (б).

скажется на гидрологическом цикле и динамике его элементов в арктическом регионе, только начинает изучаться, полученные предварительные результаты неоднозначны и требуют дальнейших исследований, включающих в себя разработку более точных методик оценки указанных изменений. Поэтому в данном разделе мы проиллюстрируем возможность использования модели SWAP для получения сценарных прогнозов изменения гидрологического режима северных рек РФ.

За основу прогнозов климатических изменений в данном регионе, необходимых для получения метеорологических прогнозов примерно до середины второй половины 21 в. были взяты четыре альтернативных сценария Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), относящиеся к семейству сценариев SRES (Special Report on Emissions Scenarios):

A1, A2, B1, B2 [20], использованных при разработке третьего оценочного доклада МГЭИК на Седьмой конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Марракеш, Марокко, 7 ноября 2001 г.). На их основе по специальной методике [16] были получены прогнозы динамики соответствующих климатических элементов, необходимые для задания верхних граничных условий в задаче прогнозирования изменения характеристик гидрологического режима исследуемых речных бассейнов. В данной работе в качестве примера мы приведём полученные результаты сценарных изменений составляющих водного баланса для бассейнов двух северных рек РФ: Северной Двины и Лены.

На рис. 5а, б показана климатическая динамика составляющих водного баланса бассейна указанных рек с 1967 по 2063 гг. При климатическом осреднении было выбрано четыре временных периода: 1967–90, 1991–2014, 2015–38 и 2039–63 гг., по которым проводилось осреднение рассчитанных составляющих водного баланса.

Как видно, для бассейнов обеих рек к началу 2-й половины 21 в. довольно значительно вырастают осадки и суммарное испарение, а сток несколько уменьшается. Для бассейна Северной Двины, находящейся в более мягких климатических условиях, указанные изменения выражены сильнее, чем для находящегося в Сибири бассейна Лены. Также приведённые иллюстрации показывают, что для всех четырёх климатических сценариев семейства SRES результаты изменений составляющих водного баланса рассмотренных бассейнов очень близки.

Естественная (вызванная погодным шумом) неопределённость стока выбранных рек

Последней задачей, рассмотренной в настоящей статье и решаемой на основе модели SWAP, является оценка естественной изменчивости составляющих водного баланса речного бассейна, вызванной, как было указано выше, погодным шумом метеорологических характеристик.

На рис. 6 показаны средние за расчётный период значения рассчитанного годового стока для рек Лены (РФ), Ганг (Индия) и Дарлинг (Австралия), диапазон его естественной изменчивости (абсолютной неопределённости), а также имеющиеся измеренные конкретные реализации стока за тот же период (периоды для всех рек

разные). Значение неопределённости годового стока конкретной реки Un (в предположении, что его функция распределения вероятности может быть аппроксимирована логнормальным распределением) было оценено на основе рассчитанных для каждого года значений стока. Полученные результаты показывали, что измеренные значения годового стока всех рассмотренных рек в основном (с 95%-й вероятностью) лежат в рассчитанном диапазоне его неопределённости. Сами значения диапазонов неопределённости стока разных рек довольно широко варьируют в зависимости природных условий речных бассейнов. В частности, они зависят от степени детерминированности годового хода питания реки. Наименьшая неопределённость стока соответствует рекам с более или менее выраженной внутригодовой цикличностью их питания.

Так, относительно малые значения неопределённости стока имеет Лена с преобладанием снегового питания и чётко выражен-

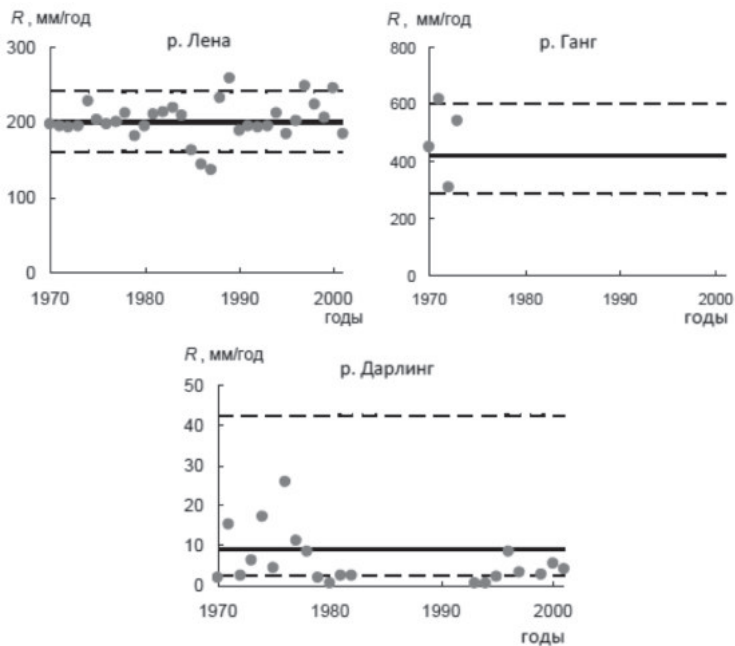


Рис. 6. Неопределённость годовых значений стока для рек Лены, Ганга и Дарлинга. Черная линия – рассчитанное среднееголетнее значение годового стока, пунктирная линия – границы рассчитанного диапазона абсолютной неопределённости годового стока с 95%-й обеспеченностью, серые кружки – измеренные значения годового стока в отдельные годы

ным весенним половодьем. Примерно такая же неопределённость стока и у р. Ганг, обладающей более или менее выраженной цикличностью питания водами летних муссонных дождей. Значительно большей неопределённостью характеризуется сток р. Дарлинг. Это связано с тем, что климат в бассейне Дарлинга можно отнести к тропическому пустынному, в связи с чем не только месячные, но и годовые осадки очень сильно варьируют в пространстве и времени, приводя к большой изменчивости стока.

Полученные значения естественной неопределённости как годовых значений стока рассмотренных рек, так и их климатических гидрографов могут быть использованы для сравнения с прогнозируемыми изменениями годовых и месячных значений климатического стока в связи с возможным изменением климата планеты и усилением антропогенного воздействия.

Заключение

Представленный обзор проблемы изучения взаимодействия поверхности суши с атмосферой показал, что одним из перспективнейших подходов к её решению является физико-математическое моделирование, основанное на описании механизмов тепло- и влагообмена в системе «почва – растительный/снежный покров – атмосфера». Систематизацией описания указанных процессов стал комплекс различных моделей взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой, в англоязычной литературе известный как LSMs.

Данный инструментарий открывает широкий круг возможностей для решения гидрологических, геофизических, экологических, водохозяйственных и других задач (в том числе и политических). Особенно важно то обстоятельство, что он применим в условиях как современного, так и изменяющегося климата и антропогенного воздействия, вызванного постоянным количественным и качественным ростом потребностей человеческой цивилизации. LSM-модели могут в какой-то мере послужить инструментом поиска компромисса между ограниченными возможностями биосферы и растущими потребностями человечества.

Что касается самих LSM-моделей, то они ещё требуют дальнейшего совершенствования в плане описания природных процессов, учёта в них хозяйственной деятельности человека, сопряжения их с

моделями общей циркуляции атмосферы и океана, подготовки информационного обеспечения, оценки неопределённости получаемых прогностических характеристик, связанных с прогнозами изменения климата и т.д. К LSM-модели могут быть подключены блоки, связанные с расчётом эрозии почв на водосборе, баланса углекислого газа, роста вегетирующего покрова суши, формирования качества вод суши и т.д. В любом случае LSM-модели являются одним из наиболее перспективных инструментов для решения указанных выше задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Т. 5. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 422 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Методика оценки динамики водного и углеродного балансов экосистемы хвойного леса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. №1. С. 81–92.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
4. Розинкина И.А. Модель Гидрометцентра России почва - растительность - приземный слой атмосферы: алгоритм и результаты тестирования // Метеорология и гидрология, 2001, №3, стр. 19–33.
5. Фолсом К. Происхождение жизни. М.: Мир, 1982. 160 с.
6. Шмакин А.Б. Параметризация процессов в снежном покрове, промерзающей и оттаивающей почве для моделей климата // Метеорология и гидрология, 1999, №2, с. 32–44.
7. Barry R.G., Serreze M.C. Atmospheric components of the arctic ocean freshwater balance and their interannual variability // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean/Eds. Lewis E.L., Jones E.P., Lemke P. et al. N.Y.: Springer, 2000. P. 45–56.
8. Boone A., Habets F., Noilhan J., Clark D., Dirmeyer P., Fox S., Gusev Y., Haddeland I., Koster R., Lohmann D., Mahanama S., Mitchell K., Nasonova O., Niu G.-Y., Pitman A., Polcher J., Shmakin A. B., Tanaka K., van den Hurk B., Verant S., Verseghy D., Viterbo P., Yang Z.-L. The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // J. Climate. 2004. V. 17. 187–208.
9. Dickinson R.E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J., Wilson M.F. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model // Tech. Note NCAR/RN-275+STR. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado, USA. 1986. 69 p.
10. Gelfan A., Semenov V. A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev, E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by the internal atmospheric variability // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015. №19. P. 2737–2754, 2015 www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2737/2015/ doi:10.5194/hess-19-2737-2015.

11. Getirana A., Boone A., Peugeot C., and the ALMIP-2 Working Group (Gusev Ye.M., Nasonova O.N., et al.). Streamflows over a West African basin from the 1 ALMIP-2 model ensemble // *J. Hydrometeorology*. (in press).

12. Grippa M., Kergoat L., Boone A., Peugeot C., Demarty J., Cappelaere B., Gal L., Hiernaux P., Mougin E., Anderson M., Hain C., and the ALMIP2 working group (Gusev Ye.M., Nasonova O.N. et al.). Modelling surface runoff and water fluxes over contrasted soils in pastoral Sahel: evaluation of the ALMIP2 land surface models over the Gourma region in Mali // *J. Hydrometeorology*. (in press).

13. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The Land Surface Parameterization scheme SWAP: description and partial validation // *Global and Planetary Change*. 1998. V.19. №1-4. P. 63–86.

14. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The simulation of heat and water exchange at the land-atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP // *Hydrological Processes*. 2002. V. 16. №10. P. 1893–1919.

15. Gusev Ye. M., Nasonova O. N., Dzhogan L. Ya., Kovalev E. E. Scenario forecasting changes in the water balance components of the Olenek and Iindigirka river basins due to possible climate change // *Proc. IAHS*, №371, pp. 13–15, 2015, proc-iahs.net/371/13/2015/ doi:10.5194/piahs-371-13-2015.

16. Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ya., Kovalev E.E. The application of the land surface model for calculating river runoff in high latitudes // *Water Resour.* 2008. Vol. 35. №2, pp. 171–184.

17. Hortal M. Aspects of the numerics of the ECMWF model // *Recent developments in numerical methods for atmospheric modelling*. – *Procs. of the ECMWF Seminar 7–11 September 1998*. Reading. UK. 1999. P. 50.

18. Lettenmaier D.P. Modelling of Runoff and Streamflow at Regional to Global Scales // *The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change* (Ed. H.R.Oliver, S.A.Oliver), NATO ASI Series 1: Global Environmental Change. 1995. Vol. 31. P. 297–316.

19. Morowitz H.J. *Energy flow in biology: biological organization as a problem in thermal physics*. N.Y.: Acad.Press. 1968. 179 p.

20. Nebojsa N., Alcamo J., Davis G., et al. IPCC Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 570 pp.

21. Noilham J., Mahfouf J.-F. The ISBA land surface parameterization scheme // *Global Planetary Change*. 1996. V. 13. P. 145–159.

22. Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C, Dalcher A. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models // *J. Atmos. Sci.* 1986. V. 43. P. 505–531.

23. Shuttleworth W.J. *Soil-Vegetation-Atmosphere Relations: Process and Prospect* // *The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change*. NATO ASI Series. Series 1: Global Environmental Change. V. 31. 1995. P. 135–162.

24. Verseghy D.L. CLASS - Canadian land surface scheme for GCMs. I. Soil model // *Int. J. Climatol.* 1991. V.11. P. 111–113.

Моделирование полей характеристик речного стока

Ю.Г. Мотовилов

Введение

В задачах планирования и управления водными ресурсами речных бассейнов все чаще возникает необходимость использования пространственно-распределённых гидрологических моделей, в особенности в случаях, когда желательно учесть пространственную изменчивость стокообразования, обусловленную распределением по территории водосбора климатических факторов, рельефа, почв, растительности и других характеристик подстилающей поверхности [27]. Однако до настоящего времени в мировой гидрологической практике имеются лишь единичные примеры исследований, связанных с моделированием пространственных полей характеристик гидрологического цикла суши для крупных речных бассейнов и территорий [8, 13, 14, 19, 23, 24, 31]. Это обусловлено в первую очередь, ограничениями в доступности пространственно-распределённой информации гидрометеорологического мониторинга, масштабными ограничениями пространственно-распределённых гидрологических моделей и отсутствием устоявшихся методик задания и калибровки полей модельных параметров.

Бурное развитие и становление пространственно-распределённых физико-математических моделей формирования стока пришлись на 1980-е гг., причём в СССР это направление активно развивалось Л.С. Кучментом и его школой [10, 11], однако уже в 1990-е гг. эйфория от успехов в описании и моделировании отдельных процессов гидрологического цикла заметно снизилась, и на протяжении последних 20-ти лет в гидрологическом сообществе активно дискутируются проблемы физико-математического моделирования речных бассейнов. Наиболее яркие критики этого направления в моделировании – К. Бивен [16, 17] и Ю.Б. и Т.Б. Виноградовы [2, 3]. Основная суть претензий к физико-математическим моделям сводится к тому, что уравнения математической физики неадекватно описывают ряд гидрологических процессов и применяются на реальных водосборах для несвойственных пространственных масштабов, где параметры моделей не могут быть измерены и их необхо-

димо калибровать подобно тому, как это делается в концептуальных моделях стока.

По мнению некоторых гидрологов, характерный масштаб речных бассейнов при использовании традиционных физико-математических моделей формирования стока ограничивается размерами небольшого (элементарного) речного бассейна. В его пределах с помощью таких моделей можно с большой детальностью воспроизводить гидрологические процессы на различных частях склонов (характерный масштаб расчётной ячейки – сотни квадратных метров) и в русловой сети. При гидрологическом моделировании больших территорий и крупных речных систем целесообразно использовать и более крупные расчётные ячейки порядка десятков, сотен или даже тысяч квадратных километров. При этом необходимо дополнительное теоретическое обоснование проблемы масштабирования в гидрологических моделях. Проблема заключается в нахождении новых (по сравнению с точкой) расчётных единиц определённого масштаба, генерализации (фильтрации) микромасштабных флуктуаций характеристик, имеющих второстепенное значение на данном уровне рассмотрения, параметризации моделей гидрологических процессов на мезо- или макромасштабном уровне и нахождении эффективных параметров моделей.

Определёнными вехами на пути разрешения проблемы масштаба являются выдвинутая Е. Вудом с соавторами [30] концепция «репрезентативной элементарной области» (representative elementary area REA) и предложенное П. Реджиани с соавторами [28] понятие репрезентативного элементарного водосбора (representative elementary watershed REW). Не вдаваясь в детали, смысл этих концепций заключается в нахождении новых (по сравнению с точкой) расчётных единиц определённого масштаба (REA или REW) и генерализации алгоритмов и параметров гидрологических моделей для этого масштаба. В рамках предложенных концепций элементарный водосбор может являться расчётной единицей для моделирования крупного речного бассейна, состоящего из множества таких элементарных водосборов. В этом случае для описания гидрологических процессов уже не требуется такая пространственная детализация, как в оригинальных физико-математических моделях – в агрегированных моделях оперируют осреднёнными в пределах элементарных водосборов пото-

ками. Поэтому для описания гидрологических процессов здесь могут быть использованы упрощённые модели, в рамках которых элементарный бассейн рассматривается как расчётная точка (модель с сосредоточенными «эффективными» параметрами).

В частности, такая идеология принята в гидрологической модели ECOMAG (ECOLOGical Model for Applied Geophysics) [12, 25, 26], где территория речного бассейна покрывается регулярной сеткой из элементов REA [26] или нерегулярной сеткой из элементарных водосборов [13, 14], для каждого из которых физически обоснованная модель с сосредоточенными параметрами описана системой обыкновенных дифференциальных уравнений, большая часть которых получена либо интегрированием базисных уравнений детальных физико-математических моделей по пространству, либо путём отбрасывания второстепенных членов этих уравнений, имеющих малый вклад в сущности протекающих гидрологических процессов на водосборе, либо привлечением принципиально иных упрощённых схем описания процессов, разумных в принятых пространственно-временных масштабах и нередко используемых в концептуальных моделях. Такого рода модели сохраняют основные черты и преимущества пространственно-распределённых физико-математических моделей, и в то же время они более эффективны при решении прикладных и исследовательских задач на более крупных речных бассейнах, так как они менее требовательны к составу и полноте исходной информации, а также менее чувствительны к ошибкам в задании этой информации. Модель ECOMAG прошла испытания на многих речных бассейнах в различных пространственных масштабах [19, 20, 24, 25] и доказала свою эффективность для расчёта гидрографов стока, в том числе на неизученных водосборах [22, 26], а также при моделировании динамики полей характеристик гидрологического цикла (влажности почвы, запасов воды в снежном покрове, модулей стока) [13, 14].

Пространственная схематизация водосборов для крупных речных бассейнов

Чтобы моделировать процессы гидрологического цикла и стекания воды по склонам водосбора и в русловой сети, необходимо провести модельную схематизацию поверхности бассейна и речной сети, информация об их древообразной структуре: – какая река в

какую реку впадает, протяжённость притоков, прилегающие склоны, с которых вода попадает на данный участок реки, типы почв и землепользования на этих участках и т.д., – закладывается в модель. В связи с этим важный компонент модельного комплекса ECOMAG – специализированный ГИС-комплекс Ecomag Extension, предназначенный для автоматизированной модельной схематизации речного бассейна [13] на основе построения полей линий тока, направлений потоков и полей аккумуляции потоков по цифровой модели рельефа (ЦМР). Ячейки с большой величиной аккумуляции (накопления) потоков образуют модельную гидрографическую сеть. После этого включается процедура разбиения рассматриваемого бассейна на расчётные водосборы, представляющие собой частные водосборные площади между узлами (точками слияния притоков) речной сети. Эти водосборы – расчётные пространственные элементы модели. Заключительным этапом моделирования речной сети является её структурно-гидрографический анализ.

Таким образом, в качестве основной расчётной пространственной единицы (расчётной ячейки) для моделирования крупных речных бассейнов в современной версии модели ECOMAG принимается водосбор малой реки (расчётный водосбор). Ввиду условности понятия «водосбор малой реки», размеры таких расчётных ячеек могут варьировать в широких пределах в зависимости от размеров речного бассейна и необходимой степени детальности его описания, задаваемой в комплексе Ecomag Extension с помощью критического числа ячеек сетки ЦМР, при «слиянии» которых образуется модельная речная сеть.

Методика калибровки модельных параметров

Большая часть параметров модели ECOMAG задаётся из баз данных характеристик подстилающей поверхности на основе почвенной и ландшафтной цифровых карт с использованием региональных справочников агрофизических и агрогидрологических свойств почв и других литературных источников. Существуют различные методологические подходы к учёту пространственной неоднородности физических параметров моделей внутри расчётных ячеек, например, введение статистических распределений почвенных параметров в явном виде [8], расчёт по квантилям распределений [3,

11] и др. Однако наиболее распространённый и простой подход заключается в совместном использовании статистических распределений и осреднённых по площади «эффективных» параметров [6, 21, 22]. Недостатки такого подхода из-за нелинейности исходных уравнений очевидны. В то же время отсутствие сколько-нибудь надёжной информации не только о статистических моментах более высокого порядка некоторых физических параметров, но и зачастую об их средних площадных значениях, на данном этапе делает этот методологический подход наиболее эффективным при решении гидрологических задач [7]. В модели ЕСОМАГ задействованы возможности статистических распределений и различных процедур пространственного осреднения параметров подстилающей поверхности с использованием ряда аппроксимаций и допущений [12]. Быдо показано, что из-за нелинейности процессов влагообмена эффективность различных процедур осреднения параметров (среднеарифметическое, среднегармоническое, среднегеометрическое) и вносимые ошибки при расчётах результирующих потоков связаны с конкретными алгоритмами для расчёта этих процессов. Более того, в ряде случаев удаётся получить аналитические оценки погрешностей, вносимых тем или иным способом осреднения параметров в расчётных ячейках речных бассейнов при переходе от точечного масштаба к масштабу ландшафтно-однородной ячейки REA и далее к масштабу элементарного (или более крупного по размерам) водосбора – расчётной ячейки модели ЕСОМАГ.

Конечно, не все параметры модели могут быть заданы на основе карт, несколько ключевых параметров (в первую очередь, вертикальный и горизонтальный коэффициенты фильтрации для типов почв и грунтов, мощность верхнего почвенного горизонта А и коэффициенты стаивания для различных типов ландшафтов и др.) уточняются в процессе калибровки (корректировки) полей модельных параметров пространственно-распределённых гидрологических моделей. К сожалению, перенос имеющегося опыта калибровки по стоку в замыкающем створе водосбора в распределённых моделях неизбежно приводит к эффектам перепараметризации моделей – невозможности получения устойчивого набора значений параметров, и эквивалентности – близости результатов моделирования с различными значениями наборов модельных параметров [2, 3, 9, 16, 18].

Для устранения причин эффектов перепараметризации и эквивалентности моделей, связанных с некорректной калибровкой модельных параметров, может быть рекомендована следующая схема:

- задание большей части физически обоснованных параметров распределённых гидрологических моделей для крупных речных бассейнов должно производиться на основе глобальных баз картографических тематических данных региона (рельеф, типы, механический состав и водно-физические характеристики почв, типы и характеристики растительности и ландшафтов);
- калибровку ряда параметров распределённых моделей, ответственных за определенные процессы, целесообразно проводить по данным регионального гидрометеорологического мониторинга этих процессов, например, параметры испарения и миграции почвенной влаги – по данным пространственных измерений (полей) влажности почвы, параметры подмодели снежного покрова – по данным снегомерных съёмок в регионе и т.п.;
- с целью сокращения количества калибруемых параметров калибровка в пространственно-распределённых моделях должна выполняться не для каждой пространственной ландшафтно-гидрологической единицы речного бассейна (например, элементарного водосбора), а для характерных типов почв и ландшафтов, слагающих эти элементарные водосборы.

Подчеркнём один важный момент, касающийся калибровки ключевых параметров модели ECOMAG. Процедура калибровки организована таким образом, чтобы сохранить соотношение между начальными значениями конкретного параметра, связанного с различными типами почв или растительного покрова. Это означает, что вместо абсолютных значений параметра для каждого типа почвы или растительного покрова калибруется множитель к абсолютным начальным значениям параметра для всех типов подстилающей поверхности [13]. Например, при калибровке коэффициентов фильтрации почвогрунтов такой подход позволяет сохранить основные соотношения между типичными значениями этих коэффициентов для различных по механическому составу (песчаных, супесчаных, суглинистых, глинистых) типов почв. Аналогичным образом в процессе калибровки ищется множитель к значениям

коэффициентов стока для различных типов подстилающей поверхности (лес, луг, поле и т.д.). Таким образом, описанный подход позволяет проводить калибровку параметров пространственно-распределённых гидрологических моделей для крупных речных бассейнов со значительным разнообразием типов почв и растительности в подстилающей поверхности.

Технологически воплощение этой схемы связано с привлечением современного аппарата обработки и анализа пространственно-распределённой картографической и мониторинговой информации средствами ГИС-технологий. Кроме того, успех от реализации такого подхода возможен только при наличии пространственных данных мониторинга характеристик гидрологического цикла суши в речных бассейнах (влажности и промерзания почвы, снежного покрова, расходов воды). При отсутствии таких данных результаты сравнения эффективности различных типов гидрологических моделей для небольших водосборов [16] не выявили заметных преимуществ распределённых моделей перед моделями с сосредоточенными параметрами, в особенности, когда речь идёт о расчётах стока в замыкающих створах водосборов. Эти преимущества проявляются при необходимости расчётов гидрографов стока и других характеристик гидрологического цикла суши в различных точках речного бассейна [9].

Следует отметить, что в силу ряда обстоятельств (в первую очередь, практическое отсутствие пространственно-распределённой расчётной информации по гидрологическим моделям для крупных территорий, трудности построения фактических полей характеристик водного баланса из-за скудости и нерегулярности поступления данных, а также редкой сети гидрометеорологического мониторинга и др.) до настоящего времени не выработались определённые стандарты количественных методов сравнения гидрологических полей. Поэтому в данном случае могут быть использованы подходы, подобные задействованным в гидрологической практике расчётов для оценки соответствия фактических и рассчитанных скалярных величин, например расходов воды, по критерию Нэша-Сатклифа (NS), рассчитываемому по формуле:

$$NS = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}, \quad (1)$$

где $F_0^2 = \sum_i (Q_i - Q_{cp})^2$, $F^2 = \sum_i (Q_{i,p} - Q_i)^2$, $Q_{i,p}$ – рассчитанный по

модели расход воды в i -е сутки, Q_i – фактический расход, Q_{cp} – средняя величина фактического расхода воды за период расчёта. Чем ближе NS к единице, тем выше точность моделирования, т.е. меньше средняя и среднеквадратическая погрешности расчёта гидрографа стока. Величины $NS \leq 0$ означают, что модель неэффективна, при $NS \geq 0,75$ соответствие гидрографов можно считать хорошим.

Критерий (1) показывает степень соответствия рассчитанных и фактических гидрографов для одной мониторинговой точки речной сети, например, в замыкающем створе водосбора. Для целей одновременного учёта эффективности модели в нескольких мониторинговых точках существуют следующие две возможности задания целевой функции:

1) осреднённый критерий в виде $NS = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M NS_i$, где M – количество пунктов сравнения;

2. средневзвешенный критерий в виде (1), в котором

$F_0^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k} - Q_{cp})^2$, $F^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k,p} - Q_{i,k})^2$, $Q_{i,k,p}$ – рассчитанный

по модели расход воды в i -е сутки в k -ом пункте сравнения, $Q_{i,k}$ – фактический расход в i -е сутки в k -ом пункте сравнения,

$Q_{cp} = \frac{1}{MN} \sum_k \sum_i Q_{i,k}$ – средневзвешенная по всем пунктам сравнения

M величина фактического расхода воды за период расчёта в N суток. В первом варианте всем створам гидрометрической сети придается одинаковый вес. Во втором случае производится взвешивание критерия NS с приданием больших весов гидрометрическим створам с большими расходами.

Кроме критерия NS, для характеристики точности модельных результатов часто рассчитываются также значения корреляционного отношения R^2 связей рассчитанных и фактических месячных, квартальных и годовых объёмов стока. Еще один критерий BIAS характеризует относительную погрешность расчёта среднегодовых объёмов стока.

При сравнении динамики полей в качестве $Q_{i,p}$ и Q_i фигурируют уже не уникальные значения характеристики в момент времени i , а

матрицы фактических и расчётных полей в момент времени i ; в качестве $Q_{\text{ср}}$ может рассматриваться среднее за период расчёта поле фактической величины либо среднее значение поля фактической величины за период расчёта. При этом сравнение рассчитанных и фактических полей в каждый момент времени осуществляется по всем узлам сетки матрицы полей.

Моделирование динамики полей запасов воды в снежном покрове и влажности почвы в бассейне волги

Испытания технологии моделирующего комплекса ECOMAG, который помимо ядра – модели формирования стока ECOMAG, включает мощные средства информационной и технологической поддержки (базы данных гидрометеорологической информации, тематические цифровые электронные карты различных масштабов, цифровые модели рельефа различного пространственного разрешения, средства управления базами данных и геоинформационной обработки пространственной информации, графическое сопровождение, управляющую оболочку и т.д.), покажем на примере моделирования динамики пространственных полей запасов воды в снежном покрове и влажности почвы в бассейне Волги [13] – важнейших характеристик кругооборота тепла и влаги в атмосфере и на суше. Для расчётов по модели привлекались цифровые карты (топографические карты миллионного масштаба; цифровые модели рельефа километрового разрешения, тематические карты (почвенная, ландшафтная и т.д.), карты-схемы расположения пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды), а также информация агрогидрометеорологического мониторинга. В пределах бассейна Волги и в непосредственной близости от его границ для расчётов и сопоставления с данными режимных наблюдений было задействовано около 350 метеостанций, 230 агрометстанций с измерениями влажности почвы, 370 пунктов маршрутных снегомерных наблюдений, около 100 гидрологических постов и 20 створов крупнейших ГЭС.

Расчёты по модели проводятся с суточным шагом по времени. Ежедневные поля метеохарактеристик на территорию речного бассейна являются входом в модель. Модель в непрерывном режиме рассчитывает поля различных характеристик гидрологического цикла. В процессе поэтапной калибровки параметров и моделирования полей снежного покрова и влажности почвы в бассейне Волги

фактические поля этих характеристик строились соответственно по данным маршрутных снегомерных наблюдений и измерений продуктивной влаги на агрометеорологических станциях в конкретные даты (раз в декаду) путём интерполяции значений в узлы пространственной километровой сетки с помощью ГИС-технологии. Рассчитанные по модели снегозапасы и влажности почвы для каждого из пространственных расчётных элементов модели в узлах километровой сетки в пределах расчётного водосбора (расчётной ячейки) задавались постоянными величинами, равными моделируемым значениям в центре этих расчётных единиц.

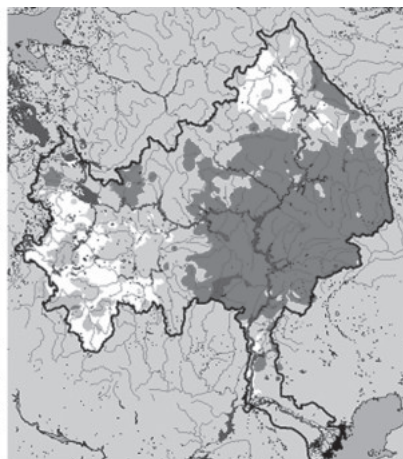
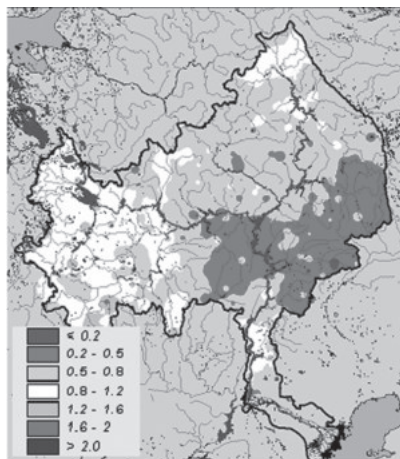
При моделировании полей запасов воды в снежном покрове калибровались два параметра модели: температурный коэффициент стайвания снега и критическая температура фазового состояния выпадающих атмосферных осадков (снег или дождь). Калибровка подмодели снежного покрова проводилась по данным снегомерных наблюдений за период 2001–03 гг. Проверка модели осуществлялась для периода 2004–11 гг.

При расчётах полей влажности почвы в бассейне Волги калибровались два параметра модели в формуле испарения из почвы. Калибровка проводилась по полям запасов продуктивной влаги (мм) в верхнем 50-сантиметровом слое почвы в бассейне Волги за период вегетации, близкого к среднему по увлажнению 2007 г. Проверка модели выполнялась для периодов вегетации экстремально засушливого 2010 г. и увлажненного 2011 г.

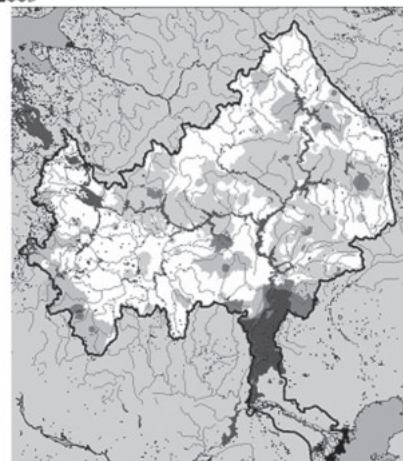
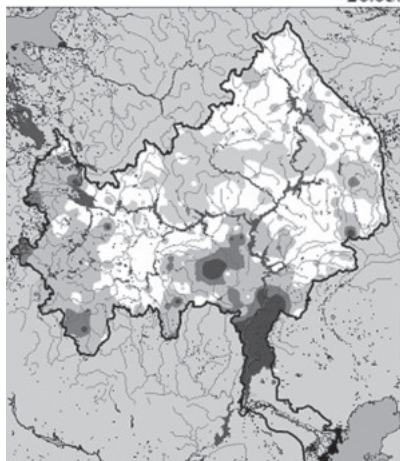
Для калибровки параметров и оценки точности модели при сравнении фактических и расчётных полей характеристик гидрологического цикла использовались различные описанные выше критерии соответствия пространственных полей.

На рис. 1 приведено сравнение фактических и рассчитанных полей нормированных запасов воды в снежном покрове в моменты максимального снегонакопления (20 марта) для 2009–11 гг., а на рис. 2 – полей запасов продуктивной влаги в верхнем 50-сантиметровом слое почвы для засушливого 2010 г. (начала периода вегетации, его середины во время засухи и конца периода вегетации).

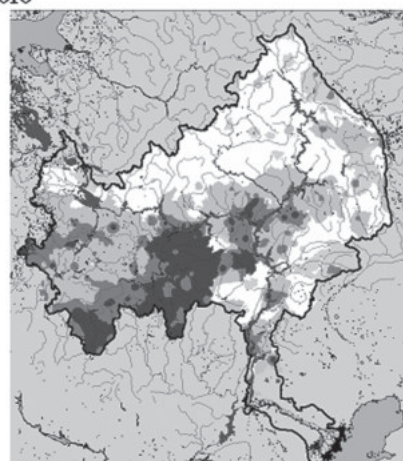
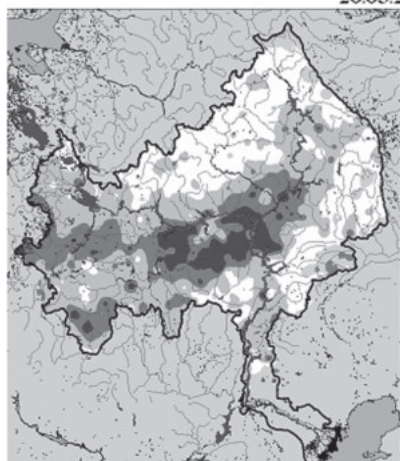
Рис. 1. Фактические (слева) и смоделированные (справа) поля нормированных запасов воды в снежном покрове в бассейне Волги на 20 марта 2009–11 гг.



20.03.2009



20.03.2010



20.03.2011

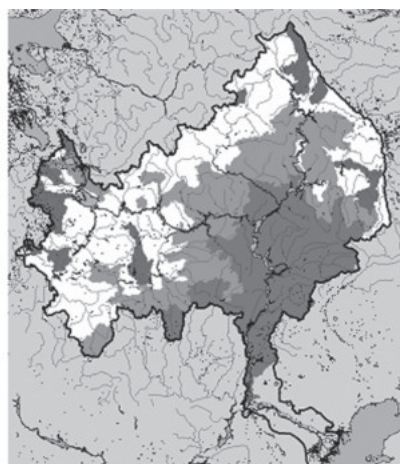
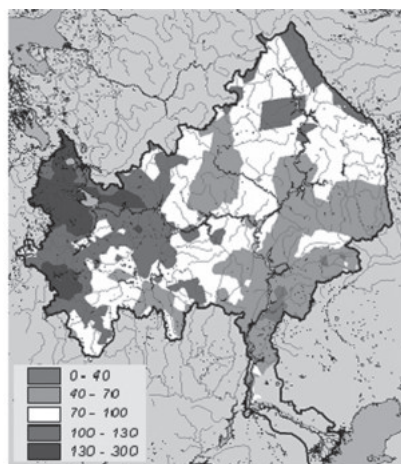
Из рис. 1 и 2 видно, что фактические и рассчитанные поля снегозапасов и влажности почвы в различных частях бассейна Волги, как правило, отличаются не более чем на одну градацию легенды рисунков. Приведённое в [13] хорошее соответствие временной динамики рассчитанных и фактических суммарных снегозапасов за период 2001–11 гг. ($NS=0,93$) и осреднённой по бассейну Волги влажности почвы ($NS=0,90$) свидетельствует как о высоком качестве модели, так и о надёжности определения этих интегральных характеристик в бассейне Волги по данным снегомерных съёмок и агрометеорологических измерений. Среднегодовое значение запасов воды в снежном покрове в бассейне Волги на дату максимального снегонакопления по данным измерений и по модельным расчётам за рассматриваемый период составили соответственно 112,8 и 112,7 км³, а среднегодовое значение запасов продуктивной влаги в верхнем 50-сантиметровом слое почвы за периоды вегетации – соответственно 66 и 63 мм.

Анализ результатов расчётов показал, что предложенный подход к моделированию пространственных полей характеристик речных бассейнов на больших территориях по многим критериям дает удовлетворительные результаты.

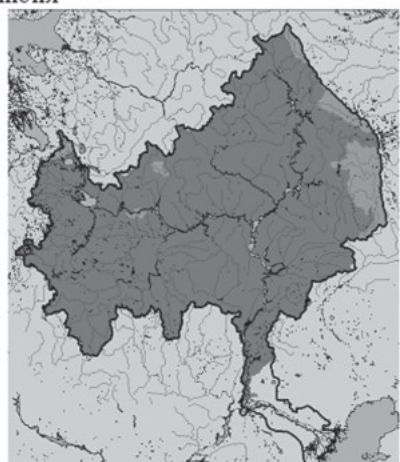
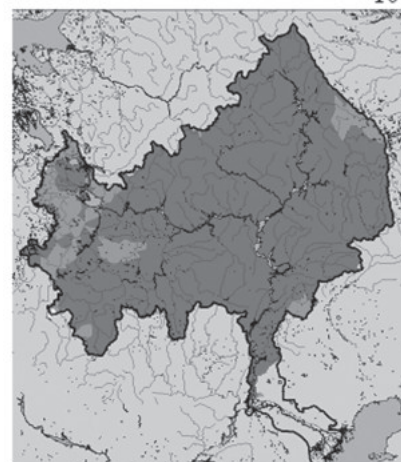
Предельные размеры расчётных ячеек для моделирования вертикальных потоков тепла и влаги

Минимальные размеры расчётных пространственных ячеек при моделировании вертикальных потоков тепла и влаги в соответствии с формулировкой модели ограничены размерами так называемых репрезентативных элементарных областей REA или элементарных водосборов REW и по различным оценкам для разных физико-географических условий чаще всего находятся в диапазоне от 1 до 10 км² [21, 22]. Максимальные размеры расчётных ячеек в принципе могут быть заданы равными площадями исследуемых водосборов. В этом случае распределённая модель формирования стока превращается в ёмкостную модель с сосредоточенными параметрами. Однако для крупных речных бассейнов такое предположение кажется неприемлемым. Гидрологу достаточно трудно представить себе, что может быть построена, например, ёмкостная модель с

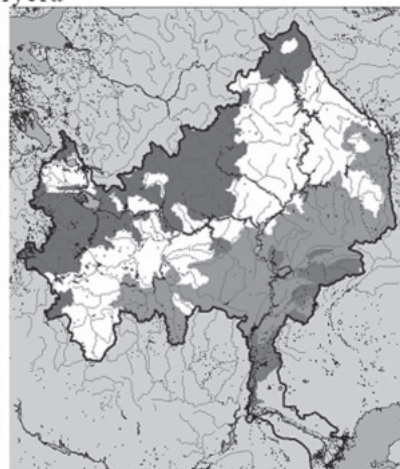
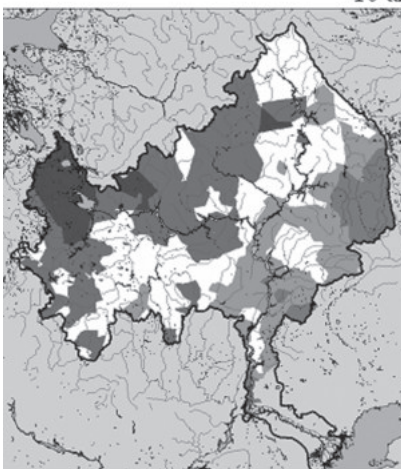
Рис. 2. Фактические (слева) и смоделированные (справа) поля продуктивной влаги в 50-сантиметровом слое почвы в бассейне Волги в 2010 г.



10 июня



10 августа



31 октября

сосредоточенными параметрами для всего бассейна Волги. Поэтому была проведена серия численных экспериментов, направленных на эмпирическое установление максимальных размеров расчётных ячеек, приемлемых с точки зрения точности расчётов относительно результатов расчётов по более мелким пространственным расчётным ячейкам. Для этого были построены поля запасов воды в снежном покрове в бассейне Волги на дату максимального снегонакопления (20 марта), рассчитанные для шести схематизаций речного бассейна с различной степенью детализации расчётных элементов. Визуальный анализ полей и объективные количественные оценки с помощью статистических критериев позволяют заключить, что заметные различия в расчётных полях и потеря точности начинают проявляться при увеличении среднего размера расчётных ячеек свыше 13500 км². Какими физическими факторами обусловлены эти размеры? Думается, что в первую очередь следует обратить внимание на поиск связей максимальных размеров расчётных ячеек с плотностью сети метеорологического и снегомерного мониторинга. Кроме того, на водосборах рек размером <13500 км² ещё не так сильно проявляется зональная пространственная изменчивость почвенных, ландшафтных и климатических характеристик, на более крупных бассейнах эти факторы уже начинают играть заметную роль. В любом случае полученные результаты требуют дальнейшего осмысления и интерпретирования.

Моделирование гидрографов стока в различных пространственных масштабах

На заключительном этапе моделирования формирования стока в речных бассейнах осуществляется расчёт трансформации по русловой системе эффективного поступления воды в речную сеть. Основная проблема корректного расчёта трансформации стока заключается в генерализации речной сети и в возможной потере так называемой первопорядковой речной сети. Суть проблемы заключается в следующем. При схематизации речного бассейна с малыми значениями расчётных пространственных шагов поступление воды со склонов (поверхностный, подповерхностный и грунтовый склоновый приток) осуществляется в детальную модельную речную сеть, по которой производится моделирование трансформации паводковых волн и гидрографов стока в каждой точке

модельной речной сети. При использовании больших расчётных ячеек воспроизводится сильно агрегированная модельная речная сеть с наиболее крупными притоками реки. Все притоки меньшего порядка (первопорядковая речная сеть по Шриву) отфильтровываются. При таких масштабах получается, что склоновое поступление воды, минуя первопорядковую речную сеть, осуществляется непосредственно в наиболее крупные притоки реки. Таким образом, на крупных масштабах в явном виде не учитываются процессы трансформации склонового поступления в первопорядковой речной сети до попадания воды в наиболее крупные притоки.

Для приближённого учёта трансформации склонового стока в «потерянной» первопорядковой речной сети в работе [13] предложены приближенные аппроксимации, полученные на основе теории подобия геоморфологического единичного гидрографа [29] с использованием наиболее характерных значений Хортоновских масштабных коэффициентов для равнинных рек.

Испытания предложенных аппроксимаций были проиллюстрированы на результатах моделирования гидрографов стока в бассейне Волги [13]. Численные эксперименты при различной степени детализации расчётных элементов показали, что эффекты добегаания воды по первопорядковой сети играют здесь второстепенную роль и при различных значениях масштабируемых параметров могут незначительно сдвинуть расчётные гидрографы на 1–2 дня, что при длительном времени прохождения половодья (до нескольких месяцев) слабо влияет на различные критериальные оценки соответствия гидрографов.

Моделирование полей стока

Поскольку естественный сток Волги нарушен имеющимся там каскадом водохранилищ, то возможности модельного подхода для построения среднемноголетних полей (карт) модуля стока здесь могут быть показаны лишь для частных водосборных площадей отдельных водохранилищ [1]. Ниже будут проиллюстрированы аналогичные результаты для более крупного объекта – бассейна реки Лены [14]. Необходимость в постановке такой задачи может возникнуть при разреженной сети гидрологического мониторинга и ограниченных рядах гидрометрических наблюдений, достаточных для калибровки модельных параметров, однако недостаточных для

построения вышеуказанных карт с необходимой надежностью: ситуация – характерная для северных территорий Азиатской части России.

Лена является крупнейшей рекой Восточной Сибири, её длина – 4260 км, площадь бассейна – 2490 000 км². Восемь основных притоков Лены имеют длину более 1000 км. Физико-географические условия бассейна Лены весьма разнообразны и включают участки как низменных, так и горных территорий, что обуславливает значительную пространственно-временную изменчивость водного режима водотоков.

Модельная схематизация водосборной площади (рис. 3г) и речной сети (рис. 3в) в бассейне Лены выполнялась с использованием ГИС-комплекса Ecomag extension на основе цифровых тематических карт региона: рельефа (рис. 3а), гидрографической сети (рис. 3б), почв и ландшафтов. Для проведения гидрологических расчётов и задания граничных условий для модели в виде ежедневных полей метеорологических характеристик в пределах бассейна Лены и в непосредственной близости от его границ было задействовано около 170 метеостанций (рис. 3в) с ежесуточными метеоданными за период 1966–2009 гг. Сопоставление результатов расчётов гидрографов стока с имеющимися данными режимных гидрометрических наблюдений за этот период выполнено для 12 гидропостов (рис. 3б).

К сожалению, процедура поэтапной калибровки параметров модели ECOMAG, показавшая эффективность для бассейна Волги [13], не применима для бассейна Лены, где регулярные измерения влажности почвы осуществляются только в районе его южной границы в зоне потенциального земледелия, а мониторинговая сеть снегомерных маршрутов весьма разрежена. Поэтому здесь калибровка осуществлялась по данным наблюдений о речном стоке в различных точках русловой сети реки Лены и её притоков за 2000–09 гг. (на рис. 3б эти гидропосты показаны синим цветом), валидация модели на независимом материале выполнялась по гидрографам стока за период 1966–99 гг., в том числе для гидропостов, которые не были включены в калибровочную серию (на рис. 3б они показаны красным цветом).

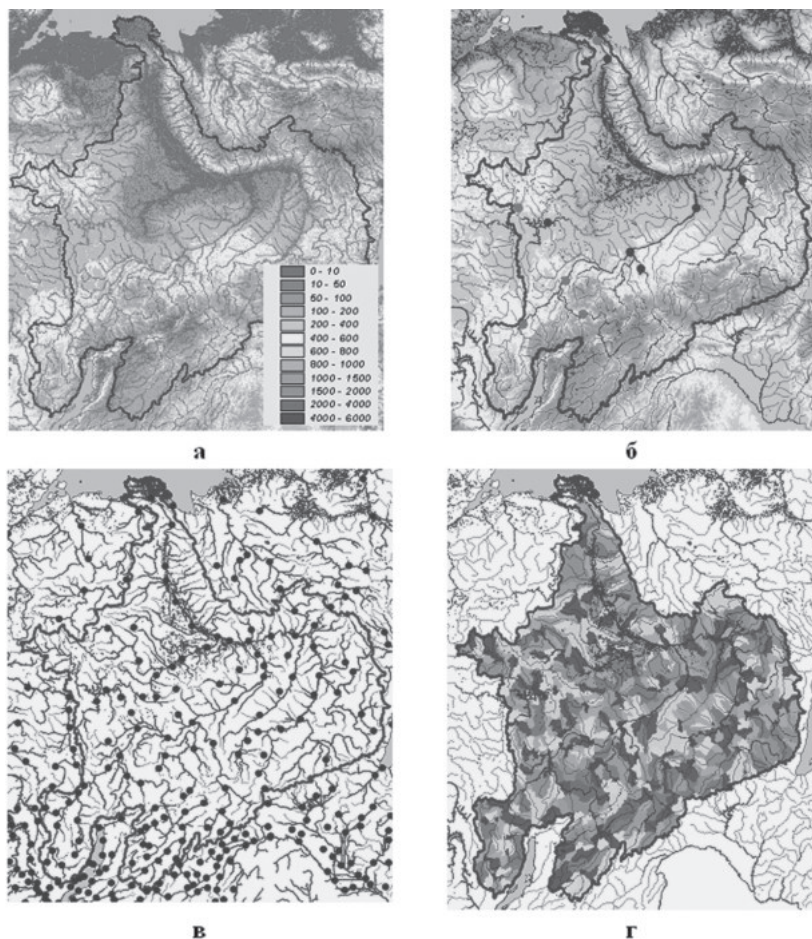


Рис. 3. Базовая информация и схематизация водосборной площади и речной сети в бассейне реки Лены: а – цифровая модель рельефа, б – векторная речная сеть и гидрологические посты, в – модельная речная сеть и метеостанции, г – расчётные водосборы

Приведённые в [14] результаты расчётов показали, что более высокие оценки соответствия фактических и рассчитанных гидрографов стока по критерию Нэша–Сатклифа получаются для гидропостов на Лене и её притоках с большими площадями водосборной площади ($NS > 0,80$). Для гидропостов с относительно небольшими водосборами (в верховьях Лены, на Вилюе, Олекме, Витиме) оценки

получаются немного хуже, но тем не менее, могут быть признаны удовлетворительными (минимальное значение $NS=0,63$).

Можно выделить следующие основные причины полученных отклонений фактических гидрографов от рассчитанных:

- 1. Невысокая и неравномерная степень освещенности метеорологическими данными территории бассейна.
- 2. Для относительно небольших водосборов важную роль начинают играть местные особенности формирования стока, которые в модели учитываются сочетаниями типов почв и растительности по территории. Использование для небольших водосборов имеющихся в наличии электронных карт этих характеристик на территории РФ масштаба 1:2500 000 может оказаться недостаточным по пространственному разрешению.
- 3. Невысокая точность определения фактических расходов воды, особенности в зимний период и в период весеннего половодья.

Расчеты поля среднемноголетнего модуля стока

Среднемноголетний модуль годового стока является одной из наиболее удобных для картирования характеристикой речного стока: он зависит от физико-географических условий и ландшафтных особенностей территории и, являясь устойчивой гидроклиматической характеристикой, отражает средний уровень баланса тепла и влаги на земной поверхности. Модуль стока является одной из важнейших характеристик речного стока, используемой в гидрологических расчётах при гидротехническом проектировании.

Существует несколько способов построения карт модуля стока [4]. При наличии данных систематических наблюдений за достаточно длительный промежуток времени величина среднего стока может быть определена путём обработки данных гидрометрических наблюдений. Относительно постепенное изменение годового стока на равнинных территориях, связанное с географической зональностью, позволяет применять метод географической интерполяции путём нанесения значения стока в геометрический центр каждого изученного водосбора и проведения между ними изолиний. В условиях недостаточности гидрометрических данных используются методы, связанные с определением модуля стока по метеорологическим данным, например, путём построения зависимостей нормы годового стока от средних годовых осадков и дефицита влаж-

ности воздуха либо используют расчёты стока по уравнению водного баланса [5].

Методика построения карты среднемноголетнего модуля стока с использованием модельного подхода сводится к следующему. По многолетним рядам метеорологических данных с суточным разрешением по станциям метеорологического мониторинга строятся ежедневные поля метеохарактеристик на территорию речного бас-

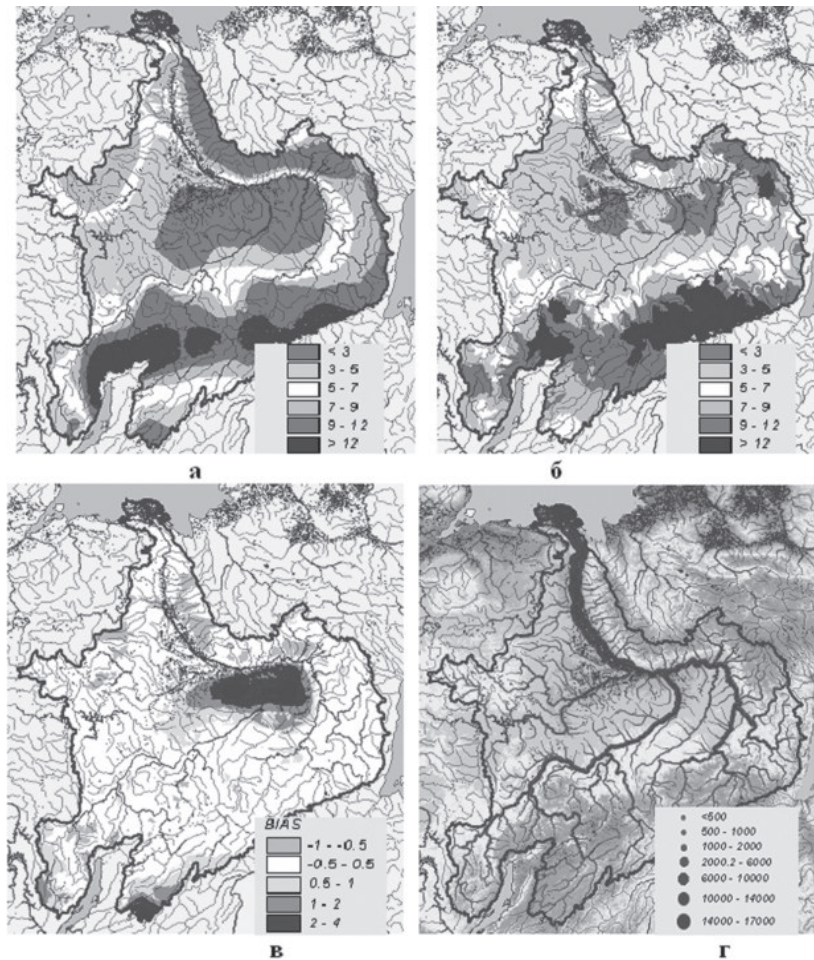


Рис. 4. Фактическая (а) и рассчитанная (б) карты модуля стока ($л/(с \cdot км^2)$), относительные ошибки расчёта (в) и распределение рассчитанных среднемноголетних расходов воды ($м^3/с$) в речной системе (г) в бассейне р. Лены

сейна и по модели ЕСОМАГ осуществляются расчёты гидрографов стока во всех элементах модельной речной сети (рис. 3в) за многолетний период. В узлах (центрах тяжести) расчётных водосборов (рис. 3г) выполняются расчёты эффективного водообразования за счёт поверхностного, подповерхностного и грунтового стока в локальную речную сеть и при осреднении за многолетний период рассчитываются среднемноголетние модули речного стока. Затем с использованием ГИС-технологии значения модуля стока в узлах расчётных пространственных элементов модели (расчётных водосборов) отображаются на карте речного бассейна.

На рис. 4а и 4б представлены соответственно приведённая в СНиП [15] карта среднемноголетнего модуля стока, построенная по данным гидрометрических наблюдений, и рассчитанная по модели. Сравнивая визуально карты на рис. 4а и 4б, можно отметить подобие пространственного распределения фактического и модельного полей модуля стока: в центральной части бассейна выделяется область чрезвычайно низкого модуля стока, по северо-восточной и восточной окраине бассейна, а также в северной части граничащей с бассейном озера Байкал территории отмечаются высокие значения модуля стока, на самых южных окраинах бассейна Лены опять выделяются области пониженного стока. Из анализируемых рисунков видно, что фактические и рассчитанные поля среднемноголетнего модуля стока в различных частях бассейна Лены, как правило, отличаются не более чем на одну градацию легенды рисунков. Диапазон фактических значений модуля стока в бассейне Лены колеблется в пределах от 0,5 до 25 л/(с·км²), диапазон расчётных значений – от 1,5 до 31 л/(с·км²). Осредненные по площади бассейна Лены значения фактического и рассчитанного модуля стока составили соответственно 6,95 и 6,84 л/(с·км²), а объёмы среднегодового стока Лены (интеграл по площади от поля среднемноголетнего модуля стока) – соответственно 539 и 531 км³. Интересно отметить, что, по оценкам автора, фактический среднегодовой сток реки за 1966–2002 гг. в створах Кюсюр и Столб, расположенных поблизости на придельтовом участке Лены (рис. 3б), составлял соответственно 539 и 490 км³, т.е. отличается на 10%, что в целом характеризует точность определения «фактического» годового стока в бассейне Лены.

Для более детальной оценки погрешностей расчётов поля среднемноголетнего модуля стока, на рис. 4в приведено поле относительных ошибок расчёта модуля стока, оценённых в каждой ячейке километровой сетки речного бассейна путём деления разности между фактическим и рассчитанным значениями модуля на его фактическое значение. Из этой картосхемы видно, что на большей части речного бассейна относительные ошибки находятся в пределах от $-0,5$ до $0,5$. В центральной части бассейна Лены выделяется область с наибольшими относительными погрешностями расчёта. Отчасти они объясняются чрезвычайно низкими фактическими значениями модуля стока на этой территории, так что даже незначительные погрешности расчёта обуславливают большую относительную погрешность.

Следует также отметить ещё один возможный источник ошибок, связанный с недостатком надёжных данных гидрометрических наблюдений при построении карты распределения фактического среднемноголетнего модуля стока. Так, при разработке одной из наиболее подробных карт модуля стока для территории СССР К.П. Воскресенским [4] были использованы данные по 5690 постам, причём около половины из них имели продолжительность наблюдений до пяти лет, что явно недостаточно для получения надёжных среднемноголетних характеристик стока.

Дополнительный гидрологический анализ результатов расчётов может быть проведён средствами ГИС-технологий. В рамках единого расчёта по модели ЕСОМАГ осуществляется моделирование гидрологического режима бассейна Лены для всех элементов модельной речной сети. На рис. 4г представлена карта распределения рассчитанных среднемноголетних расходов воды в речной системе бассейна Лены за 1966–2009 гг. Толщина линии указывает на величину расхода воды в русловой сети в соответствии с легендой. С помощью курсора на ГИС легко можно проследить расходы воды в любой точке речной сети. Точность определения среднемноголетних расходов в различных точках речной сети должна быть сопоставима с точностью определения характеристик стока на отдельных гидропостах.

Выводы

На примере бассейна Волги проиллюстрированы возможности моделирующего комплекса ЕСОМАГ для расчётов полей характе-

ристик гидрологического цикла крупных речных бассейнов (влажности почвы, запасов воды в снежном покрове, гидрографов стока) с использованием стандартной гидрометеорологической информации, цифровых карт и баз данных водно-физических характеристик почв и ландшафтов. Показаны возможности поэтапной калибровки основных параметров пространственно-распределённой модели. Установлены минимальные и максимальные размеры расчётных ячеек для моделирования процессов формирования стока в крупных равнинных речных бассейнах Европейской части России, не противоречащих основным идеям формулировки модели ECOMAG и приемлемых с точки зрения точности расчётов.

Приведены результаты модельного подхода для построения расчётанной по метео данным карты среднемноголетнего модуля стока в бассейне Лены. Визуальный анализ фактического и модельного полей среднемноголетнего модуля стока в бассейне Лены показал их внешнее подобие с сохранением пространственного распределения тенденций изменения модуля по территории. Получены близкие значения диапазонов изменения модуля стока, осреднённых по площади бассейна величин фактического и расчётанного модуля стока, а также объёмов среднегодового стока Лены. На большей части территории бассейна относительные ошибки расчёта модуля стока находятся в пределах 50%. Зона с наибольшими погрешностями приурочена к центральной части бассейна Лены с чрезвычайно низкими фактическими значениями модуля стока. Один из возможных источников ошибок может быть связан с погрешностями в построении карты фактического модуля стока, обусловленными как короткими рядами данных гидрометрических наблюдений, так и в целом недостатками, присущими интерполяционному методу определения модуля стока по расходам в русловой сети.

Полученные результаты могут быть полезны в как в научно-методическом плане для параметризации процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью в атмосферных и гидрологических моделях для крупных речных систем и территорий, так и в прикладном аспекте для задач планирования и управления водными ресурсами крупных речных бассейнов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беднарук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство, 2017. №7. С. 22–35.
2. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 304 с.
4. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза, Л.: Гидрометеиздат, 1962. 552с
5. Вутлинский В.С. Расчет нормы годового стока неизученных горных рек с применением уравнения водного и теплового балансов. // Тр. ГПИ, 1972. Вып. 200. С. 186–207
6. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 294 с.
7. Гороховский В.М. Эффективные параметры гидрогеологических моделей. М.: ГИДЭК, 2013. 232 с.
8. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
9. Кучмент Л.С. Проблемы выбора моделей формирования стока для решения практических задач. // В сб.: Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Т. 1, Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2015. С. 74–80.
10. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 144 с.
11. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока (физико-математические модели). М.: Наука, 1983. 216 с.
12. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1 Алгоритмы генерализации и осреднения // Вод. ресурсы. 2016. №3. С. 243–253.
13. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний // Вод. ресурсы. 2016. №5. С. 467–475.
14. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна Лены) // Метеорология и гидрология. 2017. №1. С. 78–88.
15. СНиП 2.01.14-83 «Определение расчётных гидрологических характеристик». // Госстрой СССР, М., Стройиздат, 1985. 36 с.
16. Abbott M.B., Refsgaard J.C. (Eds.) Distributed hydrological modelling // Wat. Sci. and Tech. Lib. / Kluwer Acad. Publ., 1996. V. 22. 321 p.
17. Beven K. Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models // J. Hydrol., 1989. V. 105. P. 157–172.
18. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review // Hydrol. Proc., 1995. V. 9. P. 251–290.
19. Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Yu, Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two

great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues. // *Climatic Change*, 2016, DOI 10.1007/s10584-016-1710-5.

20. Gelfan A., Motovilov Yu, Krylenko I., Moreido V., Zakharova E. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions. // *Hydr. Sci. J.*, 2015. V. 60 (8). P. 1266–1285.

21. Gottschalk L., Batcharova E., Gryning S.-E., Lindroth A., Melas D., Motovilov Yu., Frech M., Heininheimo M., Samuelsson P., Grelle A., Persson T. Scale aggregation – comparison of flux estimates from NOPEX // *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999. V. 98–99. P. 103–119.

22. Gottschalk L., Beldring S., Engeland K., Tallaksen L., Salthun N.R., Kolberg S., Motovilov Yu. Regional/mesoscale hydrological modeling: a Scandinavian experience // *Hydrological Sci. J.*, 2001. V. 46(6). P. 963–982.

23. Khon V. Ch., Mokhov I. I. The hydrological regime of large river basins in Northern Eurasia in the XX–XXI centuries // *Water Resources*, 2012. V. 39, No. 1. P. 1–10.

24. Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches // *IAHS Publ.*, 2013. V. 360. P. 105–112.

25. Motovilov Yu.G., L.Gottschalk, K.Engeland and A.Belokurov. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series no.105, 1999. ISBN 82–91885–04–4, ISSN 1501–6854. 88 p.

26. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K, Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999. V. 98–99. P. 257–277.

27. Refsgaard J.C., Abbott M.A. The role of distributed hydrological modelling in water resources management. // In: *Distributed hydrological modelling / Wat. Sci. and Tech. Lib. / Eds.Abbott M.B., Refsgaard J.C. Kluwer Acad. Publ.* 1996. V. 22. P. 1–16.

28. Reggiani P., Schellekens J. Modelling of hydrological responses: the representative elementary watershed as an alternative blueprint for watershed modeling // *Hydr. Proc.*, 2003. V. 17. P. 3785–3789.

29. Rodriguez-Iturbe I. The Geomorphological Unit Hydrograph // *Channel Network Hydrology / Eds. Beven K., Kirkby M.J. New York, Wiley & Sons Ltd*, 1993. P. 43– 68.

30. Wood E.F., Sivapalan M., Beven K.J., Band L. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrological modeling // *J. Hydrol.*, 1988. V. 102. P. 29–47.

31. Wrede S., Seibert J., Uhlenbrook S. Distributed conceptual modelling in a Swedish lowland catchment: a multi-criteria model assessment. // *Hydrological Res.*, V. 44.2, 2013. P. 318–333.

Динамико-стохастические модели со случайными входами в приложениях к задачам гидрологии речных бассейнов

Исследования по динамико-стохастическому моделированию весеннего половодья при поддержке РФФИ (грант № 16-05-00679); исследования предсказуемости гидрологических систем выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-17-00700П).

А.Н. Гельфан

За более чем полвека, прошедших с 1962 г., когда Р. Линсли и Н. Кроуфорд была создана Стенфордская модель – первая концептуальная модель формирования речного стока с сосредоточенными параметрами, численные гидрологические модели стали в экономически развитых странах основным инструментом решения исследовательских и прикладных задач гидрологии речных бассейнов. Структура моделей, их способность к усвоению теоретической информации о гидрологических процессах и пространственно распределённых данных измерений, методы оценки параметров и тестирования моделей претерпели за эти десятилетия радикальные изменения, связанные с развитием гидрологической теории и численных методов, революцией в компьютерной и измерительной технологиях. Уже к началу 2000-х гг. количество численных гидрологических моделей разной сложности и области применения исчислялось многими десятками (перечень наиболее широко используемых, приведённый в [48], включает 71 модель). Среди них – физико-математические модели с распределёнными параметрами, разрабатываемые, прежде всего, для исследования физических механизмов поведения гидрологических систем (как, например, Система моделей гидрологического цикла ИВПРАН [7, 13], IHDM [41], SHE [21], ECOMAG [42], CRHM [44]), иконцептуальные модели, используемые преимущественно в оперативной практике отдельных стран (например, HBV в Скандинавских странах, ARNO и TORIKAPI в Италии, UBC и WATFLOOD в Канаде, Xinanjiang в Китае, Модель ГМЦ в РФ).

Резервы повышения эффективности гидрологических моделей – детерминистических по входящим в их структуру уравнениям и зависимостям, связываются, как правило, с возможностями учёта более подробной детерминистической информации, как то: уточнение параметризации гидрологических процессов, привлечение

дополнительных источников данных, увеличение их пространственного и временного разрешения, уточнение связей параметров модели с характеристиками водосбора и т.п. Вместе с тем, многие источники ошибок модели имеют вероятностную природу, и их влияние не может быть полностью нивелировано учётом детерминистической информации; иными словами, сколь совершенная детерминистическая модель, обеспеченная всеми необходимыми и точными измерениями, ни использовалась бы для описания гидрологических процессов, всегда остаются пространственные и временные масштабы, на которых сохраняется неопределённость, не описываемая этой детерминистической моделью.

К основным источникам неопределённости гидрологической модели относятся: ограниченность временных рядов метеорологических измерений, которые используются для идентификации, калибровки и тестирования модели, недостаток данных для задания граничных условий на пространственных масштабах, не описываемых имеющимися измерениями, дефицит данных для задания начальных условий и параметров модели, ошибки измерений.

Учёт различных источников неопределённости, присутствующих в детерминистической модели, достигается включением в неё соответствующей вероятностной информации. Идея о том, что недостаток физической, детерминистической информации о гидрометеорологических величинах и свойствах водосбора может быть восполнен, в какой-то мере, учётом в модели информации об их вероятностных свойствах, давно используется в гидрологии (примеры см. [1]). Естественно, с усложнением структуры детерминистической модели, её требований к составу и пространственно-временному разрешению исходных данных растёт и число источников неопределённости. С другой стороны, именно в способности модели к адекватному усвоению имеющейся априорной информации, не только детерминистической, но и вероятностной, содержится резерв расширения её возможностей как инструмента научных исследований и решения прикладных задач. Разработка модели, основанной на детерминистическом описании гидрологических процессов с учётом вероятностной информации о неопределённости используемых моделью исходных данных, составляет предмет динамико-стохастического моделирования [11, 1].

Одним из перспективных и интенсивно развивающихся направлений в области динамико-стохастического моделирования является разработка численных динамико-стохастических моделей со случайными входами, учитывающих вероятностную природу метеорологических воздействий на речной водосбор. В структуре таких моделей объединены два компонента: детерминистическая гидрологическая модель и стохастическая модель временных рядов метеорологических величин (т.н. «стохастический генератор погоды»), задаваемых на входе детерминистической модели. Методология построения численных динамико-стохастических моделей со случайными входами была обоснована в начале 1980-х гг. Л.С. Кучменом [13], и её развитие описано во многих совместных работах в течение последующих без малого 30 лет [8, 9, 10, 11, 12, 32, 33, 34, 36]. В этих работах представлены динамико-стохастические модели формирования дождевого и талого стока, предложены методы построения стохастических генераторов погоды для гидрологических приложений, разработаны экономичные алгоритмы численной реализации моделей при большом числе статистических испытаний, на примере нескольких речных бассейнов показаны возможности применения динамико-стохастических моделей для решения актуальных задач: построения физически обоснованной оценки характеристик речного стока малой обеспеченности, долгосрочного вероятностного прогноза весеннего половодья. Мировой опыт развития методов динамико-стохастического моделирования в гидрологии речных бассейнов изложен во многих десятках публикаций (их обзор и перечень существующих динамико-стохастических моделей со случайными входами дан в книге [1]).

В настоящей статье представлены некоторые новые результаты этой области, полученные за последние годы в лаборатории гидрологии речных бассейнов ИВП РАН. Описаны три динамико-стохастические модели со случайными входами: (1) модель формирования притока воды в бассейне Чебоксарского водохранилища и её применение для ансамблевого долгосрочного прогноза незарегулированного притока воды в водохранилище; (2) модель формирования снежного покрова и её применение для описания макромасштабной структуры поля снежного покрова и (3) модель неизотермического влагопереноса в мерзлой почве и её применение для оценки

предела предсказуемости изменений запасов почвенной влаги. В статье использованы материалы совместных публикаций [2, 3, 30, 31].

Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в чебоксарское водохранилище на основе динамико-стохастической модели формирования стока

Усиление требований к экономической эффективности и безопасности эксплуатации водноресурсных систем обуславливает необходимость совершенствования существующих методов долгосрочных прогнозов речного стока, повышения их точности, заблаговременности и информационного содержания. Возможности модернизации существующих оперативных методик (в большинстве своём, эмпирических, разработанных в середине прошлого века) весьма ограничены, прежде всего из-за нарушений однородности рядов речного стока и его предикторов. Эти нарушения могут быть связаны с сокращением сети гидрологических наблюдений (примерно на 30% за последние 30 лет [25]), переходом на новые измерительные технологии, изменением водного режима рек в связи с изменением климата и хозяйственной деятельности. Современной методической базой модернизации методов долгосрочных гидрологических прогнозов служат модели формирования речного стока, описывающие разнообразие гидрологических процессов в речном бассейне с использованием имеющихся данных гидрометеорологических наблюдений, информации о природных особенностях бассейна. Применение таких моделей позволяет получить прогноз не только объёма и максимального расхода стока, но и других характеристик водного режима, что даёт дополнительную информацию пользователям прогноза и создаёт резервы повышения эффективности принятия решений. Дополнительные возможности расширения информационного содержания прогнозов связаны с переходом от традиционных детерминистических к ансамблевым прогнозам, результаты которых могут быть представлены в вероятностной форме с учётом различных источников ошибок прогнозов. Совершенствование «методов выпуска гидрометеорологических долгосрочных прогнозов (месяц, сезон), а также прогнозов экстремальных гидрометеорологических явлений и характеристик, обладающих большой степенью неопределённости, в вероятностной форме»

признано российским профессиональным сообществом одной из приоритетных задач научных гидрологических исследований [18]. В отечественной практике методические основы ансамблевых долгосрочных прогнозов характеристик весеннего половодья на основе динамико-стохастических моделей его формирования впервые разработаны в Институте водных проблем РАН под руководством Кучмента и опубликованы в совместных работах [9, 10]. Исследования, описанные ниже, являются развитием методологии, представленной в указанных публикациях

Модель формирования притока воды в Чебоксарское водохранилище: результаты тестирования.

Нами использовалась физико-математическая модель формирования стока с распределёнными параметрами ECOMAG (ECological Model for Applied Geophysics), созданная Ю.Г. Мотовиловым [42, 15] на базе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов Института водных проблем РАН [13]. Модель описывает процессы формирования и таяния снежного покрова, гидротермические процессы в почве при её промерзании и оттаивании, инфильтрации воды в мерзлую и незамерзшую почву, испарения и эвапотранспирации, стекания воды по поверхности водосбора, подповерхностного и грунтового стока, движения воды в речной системе. Многочисленные примеры успешных испытаний модели ECOMAG, по данным наблюдений в речных бассейнах площадью от десятков до миллионов км², расположенных в разных климатических условиях, даны, например, в библиографии к статье [30].

Для схематизации водосбора Чебоксарского водохранилища и задания параметров модели использовались цифровые модели рельефа с разрешением 1 км и серии цифровых тематических карт (почвенная, ландшафтная и т.д.). В качестве граничных условий задавались ряды среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, интенсивности осадков по данным наблюдений на 157 метеорологических станциях с 1.01.1982 по 31.07.2016.

Модель калибровалась и проверялась по данным о боковом притоке воды к Чебоксарскому водохранилищу за 35 лет – с начала его функционирования в 1982 г. по 2016 г. Калибровка модели производилась по фактическим данным о расходах воды за 2000–14 гг.; про-

верка модели на независимых данных производилась для периода 1982–99 гг., а также за 2015 и 2016 гг.

Систематическая относительная погрешность расчёта ежедневного притока воды в водохранилище за 35-летний период составила 1%, среднеквадратическая погрешность расчётов составила порядка 870 м³/с при стандартном отклонении фактических величин 2109 м³/с. Рассчитанные ежедневные расходы воды за весь период сравниваются с фактическими величинами на рис. 1. Полученные удовлетворительные результаты апробации модели по данным гидрометеорологических наблюдений дают основание использовать её в качестве детерминистического компонента разрабатываемой динамико-стохастической модели.

Стохастическая модель гидрометеорологических воздействий на водосбор («стохастический генератор погоды»).

«Стохастический генератор погоды» – принятый в климатологии термин для обозначения комплекса стохастических моделей, позволяющих получать методом Монте-Карло многолетние искусственные ряды метеорологических переменных суточного разрешения, статистические свойства которых и во времени, и по пространству близки к свойствам метеорологических рядов наблюдения.

Нами был разработан стохастический генератор погоды MSFR_WG (Multi-Site FRagment-based stochastic Weather Generator) [31], предназначенный для моделирования методом Монте-Карло многолетних временных рядов «входных» величин гидрологической модели (среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, интенсивности осадков) с учётом взаимной временной и пространственной статистической связности между ними. В основу генератора погоды положен метод пространственных фрагментов, представляющий собой модификацию метода фрагментов Г.Г. Сванидзе [19]. Ниже коротко изложен алгоритм разработанного метода.

Рассчитываются нормализованные поля (пространственные фрагменты) среднесуточных значений метеорологических переменных по данным наблюдений на 157 станциях за 51 год (1966–2016 гг.). Пространственные фрагменты строятся для каждого года наблюдений путём нормирования метеорологических переменных полей

Таблица 1

Список параметров модели MSFR_WG и их значения для водосбора Чебоксарского водохранилища (за 1966–2016)

№ п/п	Название параметра	Значение для рассматриваемой территории
1	Среднегоголетняя, средняя по площади температура воздуха, °С	4,58
2	Среднегоголетняя, средняя по площади интенсивность осадков, мм/сут	1,52
3	Среднегоголетний, средний по площади дефицит влажности воздуха, мб	3,15
4	Стандартное отклонение средней по площади среднегодовой температуры воздуха, °С	0,99
5	Стандартное отклонение средней по площади среднегодовой интенсивности осадков, мм/сут	0,18
6	Стандартное отклонение среднего по площади среднегодового дефицита влажности воздуха, мб	0,69
7	Коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади осадков и температуры воздуха	Статистически незначимый
8	Коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади осадков и дефицита влажности воздуха	-0,51
9	Коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади температуры и дефицита влажности воздуха	Статистически незначимый

наблюдения на их среднее значение по пространству в рассматриваемом году.

Следующий шаг – моделирование методом Монте-Карло многолетних искусственных последовательностей средних по пространству среднегодовых значений искомым метеорологических переменных с учётом их взаимной корреляции.

Заключительный шаг алгоритма – расчёт полей среднесуточных значений метеорологических переменных путём умножения смоделированных среднегодовых, средних по площади значений каждой метеорологической переменной на соответствующий пространственный фрагмент. Фрагмент выбирался из созданного ранее набора фрагментов методом латинского гиперкуба.

Метод пространственных фрагментов – малопараметрический по сравнению с методами, обычно применяемыми в пространственно распределённых генераторах погоды и основанными на использовании аналитических пространственных корреляционных функ-

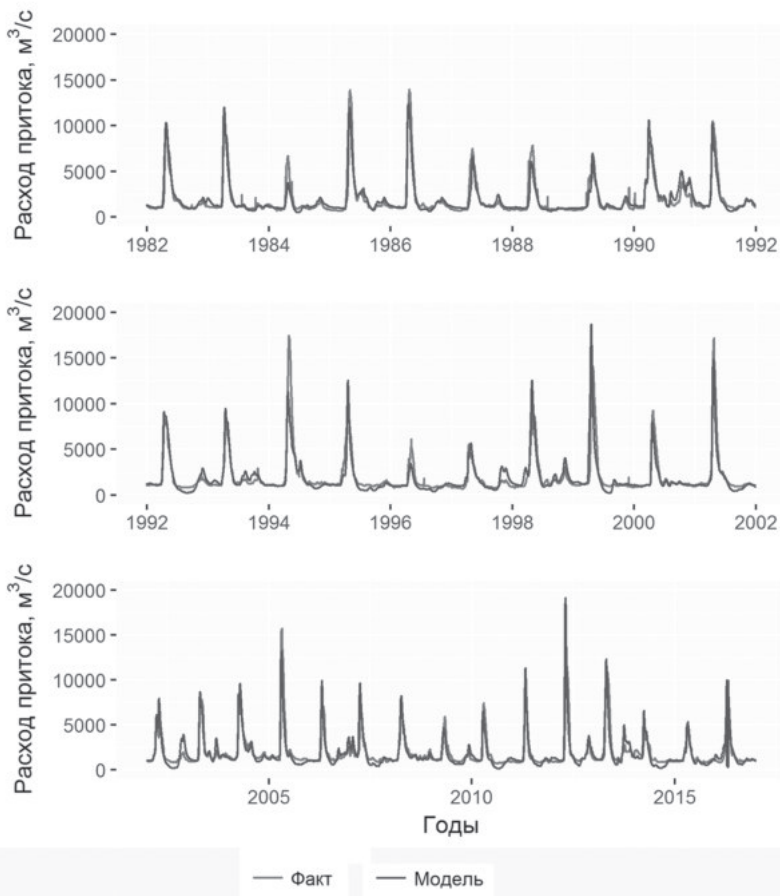


Рис. 1. Рассчитанные (синяя линия) и фактические (красная линия) расходы бокового притока воды к Чебоксарскому водохранилищу

ций. Разработанный генератор погоды имеет всего 9 параметров, перечисленных в табл. 1. Здесь же даны оценки параметров, определённые методом моментов по данным многолетних метеорологических наблюдений в рассматриваемом бассейне.

С помощью модели MSFR_WG методом Монте-Карло были смоделированы соответствующие современному климату искусственные ряды среднесуточных значений интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха длиной 1000 лет для каждой станции на рассматриваемой территории. Для проверки качества разрабо-

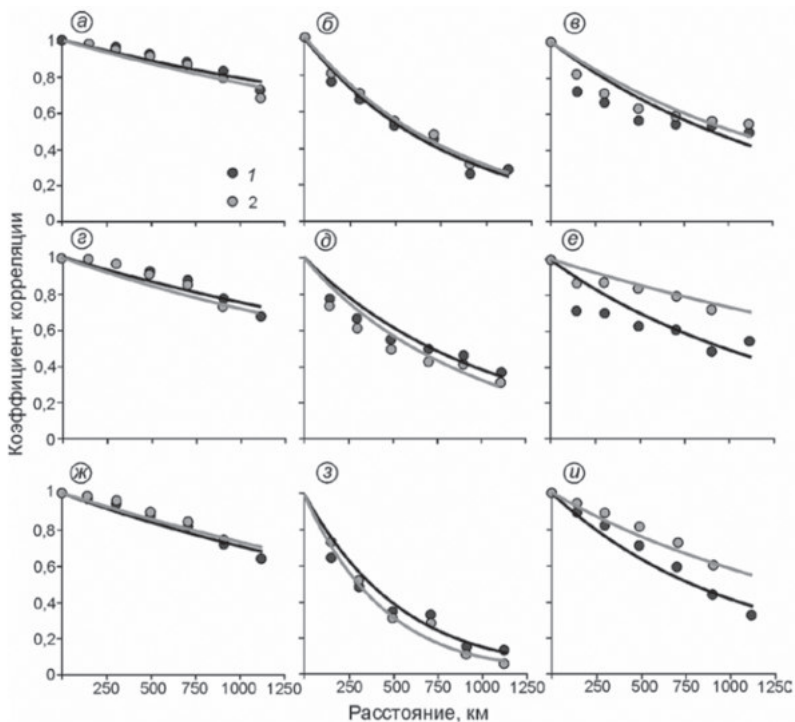


Рис. 2. Пространственные корреляционные функции среднемесячных значений температуры воздуха (левая колонка), интенсивности осадков (средняя колонка) и дефицита влажности воздуха (правая колонка) за январь (а–в), февраль (г–е) и март (ж–и), определённые по фактическим (1) и рассчитанным (2) данным. Линиями показаны аппроксимирующие экспоненциальные функции

танного генератора погоды сравнивались статистические характеристики, определённые по фактическим и искусственным рядам метеорологических переменных: средние многолетние величины за год, месяц и сутки; стандартные отклонения среднегодовых и среднемесячных величин; корреляции между среднегодовыми (среднемесячными) значениями на отдельной станции и соответствующими значениями на других станциях; пространственные корреляционные функции значений осадков, температуры и влажности воздуха, осреднённых за разные временные интервалы (год, месяц, сутки).

Подробно результаты проверки разработанного генератора погоды приведены в [14]. Показано, что статистики искусственных

рядов искомым метеорологических переменных оказались в пределах стандартного отклонения оценок соответствующих характеристик по рядам наблюдений за этими метеорологическими переменными на рассматриваемой территории. Важно подчеркнуть, что этот вывод оказался справедлив для разных временных осреднений искомым переменных – от суток до года. На рис. 2 в качестве примера показаны пространственные корреляционные функции среднемесячных значений метеорологических переменных для января–марта.

Удовлетворительные результаты проверки стохастического генератора погоды MSFR_WG позволяют использовать его для задания пространственно распределённых случайных входов в описанную выше детерминистическую гидрологическую модель.

Схема долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу и результаты её верификации

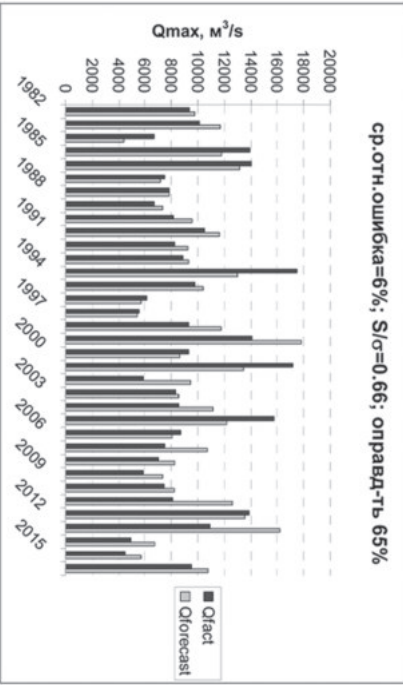
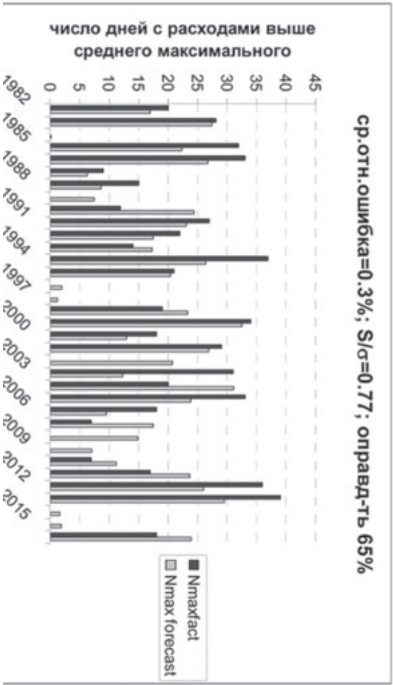
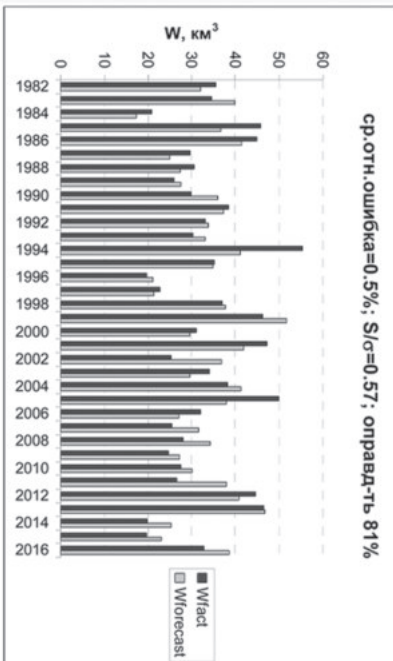
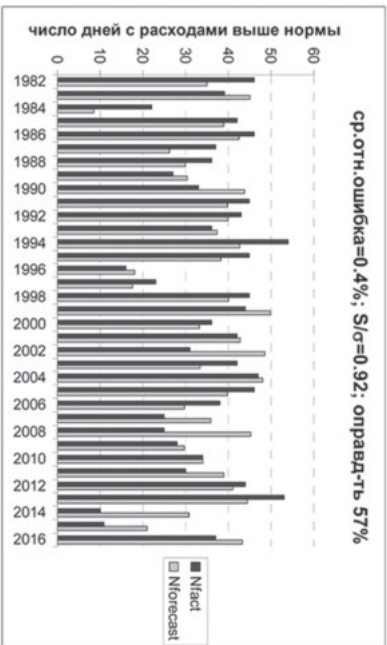
Схема долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу с использованием описанной динамико-стохастической модели состоит в следующем:

1. По данным метеорологических наблюдений за осенне-зимний период с помощью гидрологической модели рассчитываются характеристики водосбора (запасы воды в снежном покрове, глубина промерзания и влажность почвы, запас воды в русловой сети и др.) на дату выпуска прогноза (например, 1 марта).

2. С помощью генератора погоды строится ансамбль из 1000 искусственных сценариев погоды за период заблаговременности прогноза (3–4 месяца). Каждый сценарий представляет собой набор полей температуры и влажности воздуха, интенсивности осадков за каждые сутки периода заблаговременности прогноза.

3. По смоделированным начальным условиям на дату выпуска прогноза и сценариям погоды за период заблаговременности прогноза, задаваемым на входе гидрологической модели, рассчитывается ансамбль из 1000 прогнозируемых гидрографов притока воды к

Рис. 3. Детерминистический (средний по ансамблю) проверочный прогноз объёма (слева вверху), и максимального расхода (справа вверху) притока воды к водохранилищу, продолжительности периодов разной водности (внизу) за 2-й квартал. Синие столбцы – фактические значения, серые – прогноз



водохранилищу для каждого из 35 сезонов проверочного ряда (1982–2016 гг.).

4. По полученным ансамблям характеристик притока, определённых по рассчитанным гидрографам, строятся функции распределения вероятности указанных характеристик для каждого из 35 сезонов проверочного ряда. Прогнозировались следующие характеристики притока: объём и максимальный расход, а также продолжительности двух периодов высокой водности (с расходом воды выше нормы, $4250 \text{ м}^3/\text{с}$, и выше среднего максимального расхода, $9355 \text{ м}^3/\text{с}$).

На рис. 3 в качестве примера показан прогноз притока за второй квартал, представленный в детерминистической форме, т.е. в виде средних по ансамблям из 1000 значений прогнозируемых величин. В поле диаграмм приведены величины относительной ошибки прогноза, отношения S/σ стандартного отклонения ошибок прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины, а также значения оправдываемости прогнозов ([17]).

Детерминистический прогноз характеристик притока воды к водохранилищу может считаться удовлетворительным для объёма и максимального расхода притока [17], а также для числа дней с расходом притока выше среднего максимального. Число дней с расходом притока выше нормы прогнозировалось с меньшей точностью.

Результаты ансамблевых прогнозов гидрографов весеннего стока могут быть представлены в вероятностной форме, что даёт возможность оценить риск принятия решений и выстроить на этом основании более гибкую систему управления водноресурсной системой, чем в случае детерминистического (однозначного) прогноза. Наиболее распространённое и информативное представление вероятностного прогноза речного стока заключается в построении интегральной функции распределения вероятности прогнозируемой величины. На сравнении интегральных функций распределений вероятности прогнозируемой и наблюдаемой величин стока построены методы верификации вероятностных прогнозов, широко применяемые в оперативной метеорологии, и со сравнительно недавних пор, используемые для оценки качества ансамблевых гидрологических прогнозов (см., например, [9]).

Ординаты интегрального распределения вероятности прогнозируемой характеристики стока $y_{\text{пр}}$ для j -го сезона из проверочного ряда рассчитываются как

$$F_m(j) = \sum_{i=1}^m f_i(j), \quad m=1, \dots, M; j=1, \dots, N,$$

где M – число интервалов вероятностей, на которое разбивается отрезок $[0;1]$; N – число проверочных прогнозов; f_i – частота попадания прогнозируемой величины в заданный интервал.

Ординаты интегрального распределения вероятности фактической характеристики стока $y_{\text{факт}}$ для j -го сезона из проверочного ряда оцениваются как:

$$O_m(j) = \sum_{i=1}^m o_i, \quad m=1, \dots, M; j=1, \dots, N,$$

где $o_i=1$ в интервале, куда попала наблюденная величина, и $o_i=0$ в остальных интервалах.

На рис. 4 в качестве примера вероятностного представления ансамблевого прогноза показаны функции распределения вероятности прогнозируемых объёмов притока воды к водохранилищу, построенные по рассчитанным ансамблям для каждого года проверочного периода, в сравнении с функциями распределения соответствующих фактических объёмов притока.

Важно подчеркнуть отличие описанной схемы ансамблевого прогноза, в которой используются смоделированные метеорологические сценарии за период заблаговременности прогноза, от пространенной в США схемы ESP (Ensemble Streamflow Prediction) [43]. Последняя основана на предположении, что фактические сценарии погоды, наблюдавшиеся ранее за период заблаговременности прогноза, репрезентативны для использования их в качестве ансамбля метеорологических условий после даты выпуска прогноза [27]. Рассчитанный с помощью гидрологической модели ансамбль прогнозируемых характеристик стока используется для построения распределения вероятности этих характеристик и выпуска прогноза в вероятностной форме. Вместе с тем, задаваемые на входе модели фактические метеорологические данные далеко не исчерпывают возможных сценариев погоды за период заблаговременности; желательно учесть не только наблюдавшуюся ранее погоду, но и возможные метеорологические условия, которые могут

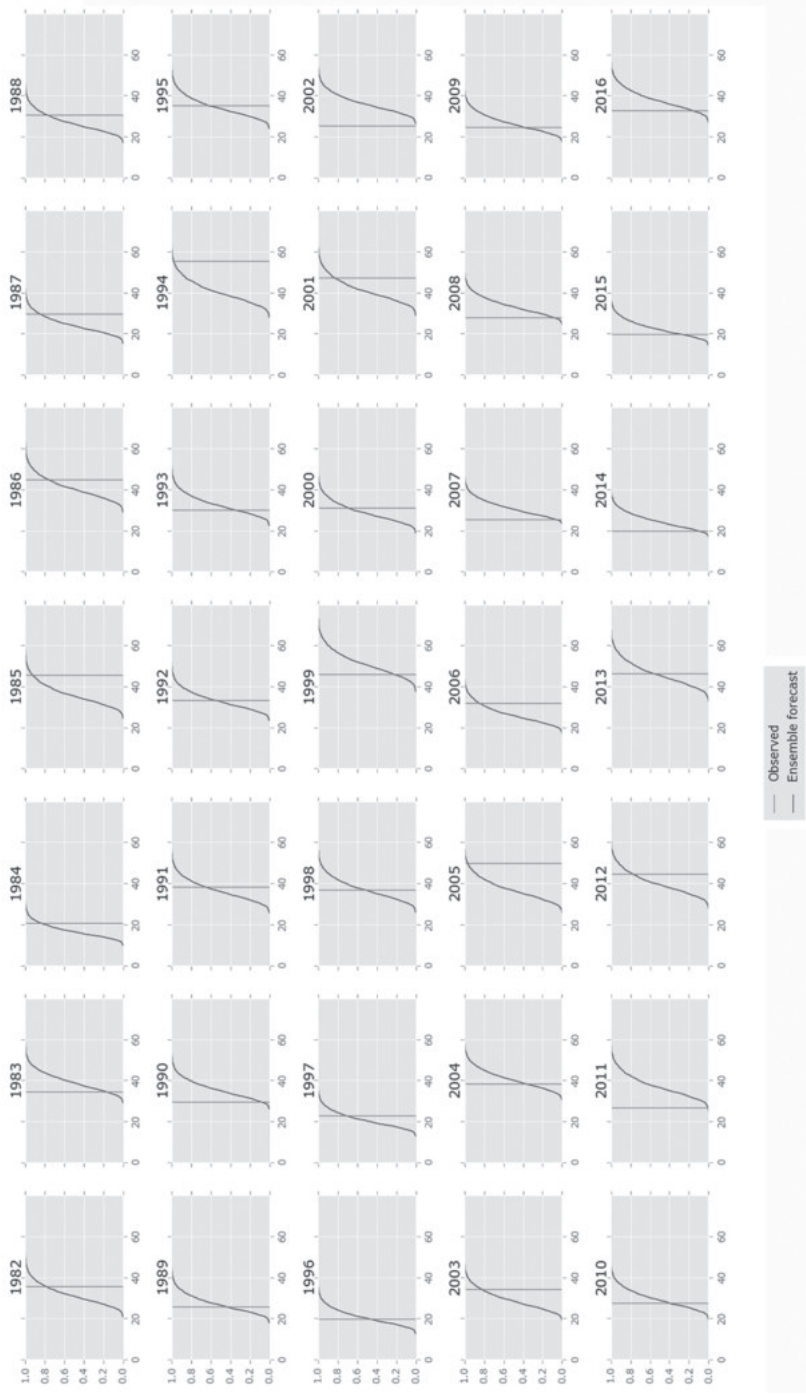


Рис. 4. Интегральные распределения вероятности проверочных прогнозов объёма притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2-й квартал (синие кривые) в сравнении с распределением вероятности фактических значений объёма притока (красные кривые).

привести к формированию редких по масштабу половодий. Представление о вероятности такого половодья может играть важную роль при принятии решений. Кроме того, поскольку размер ансамбля прогнозируемых величин стока ограничен числом наблюдаемых сценариев погоды за период заблаговременности прогноза и обычно не превышает нескольких десятков членов, выборочная изменчивость кривых распределения вероятности прогнозируемых величин может стать слишком высокой. Это в свою очередь, влияет на устойчивость критериев качества вероятностного прогноза и может создать трудности при интерпретации его результатов. Обе проблемы, возникающие из-за небольшого, как правило, количества наблюдаемых сценариев погоды, используемых в схеме ESP, могут быть решены путём применения предлагаемой схемы прогноза с помощью динамико-стохастической модели. В качестве иллюстрации, на рис. 5 показаны 95%-е доверительные интервалы кривых распределения вероятности нескольких проверочных прогнозов притока воды в Чебоксарское водохранилище, рассчитанных по схеме ESP и по динамико-стохастической модели. (Доверительные интервалы рассчитаны с использованием неравенства Дворецкого-Кифера-Волфовица [40]). Рисунок показывает намного большую неопределённость кривой распределения прогнозов, рассчитанных по схеме ESP при использовании сценариев погоды за 51 год наблюдений, по сравнению с распределением прогнозов, рассчитанных по модели.

В заключение перечислим основные особенности предлагаемой динамико-стохастической схемы долгосрочного ансамблевого прогноза в сравнении с традиционно используемыми в отечественной оперативной практике:

1. Начальные (на дату выпуска прогноза) условия в речном бассейне (запасы воды в снеге и в русловой сети, влажность и промерзание почвы) рассчитываются по данным стандартных метеорологических наблюдений. Это существенное достоинство методики в условиях сокращения сети снегомерных наблюдений и наблюдений за промерзанием почвы, а также отсутствием данных о влажности почвы в зимнее время.

2. Прогнозируется набор характеристик водного режима, включая объём и максимальный расход весеннего стока, продолжитель-

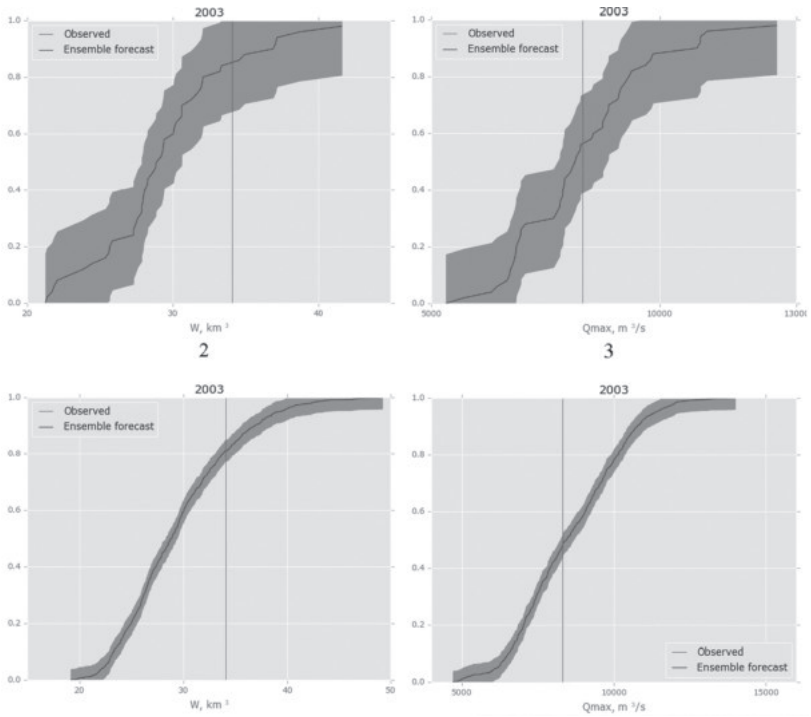


Рис. 5. Вероятностный проверочный прогноз объёма (слева) и максимального расхода (справа) притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2-й квартал 2003 г. Вверху – прогноз по схеме ESP, внизу – по динамико-стохастической модели. Серой полосой показан 95%-й доверительный интервал ординат кривой распределения

ности периодов разной водности, что позволяет существенно расширить информационное содержание выпускаемых прогнозов.

3. Имеется возможность выпуска прогноза и в детерминистической, и в вероятностной формах в рамках одной методики.

4. На единой методической основе даётся прогноз водного режима в разные сезоны года. Существующие методики долгосрочного гидрологического прогноза различаются в зависимости от прогнозируемой фазы водного режима (весеннего половодья, летней межени, зимнего стока) расчётными схемами, требованиями к исходной информации, предикторами и точностью их оценки по данным измерений, набором параметров и т.п.

Динамико-стохастическое моделирование полей характеристик снежного покрова на равнинном водосборе

Макромасштабные изменения характеристик снежного покрова, обусловленные физико-географической и климатической зональностью, проявляются для равнинных территорий на расстояниях от десятков до сотен километров [39]. Пространственная изменчивость характеристик снежного покрова и особенности их корреляционной структуры на макромасштабе играют важную роль в процессах энерго- и массообмена поверхности суши с атмосферой в высоких широтах. В большинстве современных глобальных моделей климата эта изменчивость учитывается как подсеточная для уточнения описания атмосферных процессов. Существенное влияние макромасштабная изменчивость снежного покрова оказывает на процессы гидрологического цикла суши, в частности, на формирование весенне-летнего половодья, определяющего водный режим крупнейших рек Евразии.

Существующие методы исследования вероятностных свойств макромасштабной структуры снежного покрова основаны, в большинстве своём, на эмпирическом анализе имеющихся данных снегомерных наблюдений. Значительные достижения в этой области связаны с применением методов объективного анализа метеорологических полей, которые были развиты, прежде всего, в работах отечественных метеорологов (например, [6]). Вместе с тем, эмпирические оценки макромасштабной изменчивости и корреляционной структуры поля снежного покрова содержат существенную неопределённость, обусловленную малой продолжительностью рядов наблюдений и их нестационарностью, связанной с изменениями условий формирования снежного покрова, в том числе вследствие происходящих изменений климата, модернизации измерительных технологий, изменения частоты и состава наблюдений. Перспектива уточнения свойств пространственной структуры поля снежного покрова связана с возможностью их описания по данным о полях метеорологических переменных и характеристиках подстилающей поверхности. Указанная возможность может быть реализована путём построения динамико-стохастической модели формирования снежного покрова с пространственно распределёнными случайными входами. Ниже представлены результаты применения такой

модели, разработанной в ИВП РАН [3], для описания пространственной структуры поля снежного покрова в бассейне Чебоксарского водохранилища.

Детерминистический компонент разработанной динамико-стохастической модели – однослойная модель формирования снежного покрова, предложенная Ю.Г. Мотовиловым [16] и многократно использовавшаяся для расчётов формирования талого стока на речных водосборах, расположенных в разных природных условиях (см. обзор публикаций в книге [1]). Модель рассчитывает изменения высоты и плотности снежного покрова в процессе его формирования и таяния с учётом поступления твёрдых и жидких осадков, фазовых переходов в толще снега, задержания талой воды, уплотнения снега под действием собственного веса. Второй компонент динамико-стохастической модели – стохастический генератор погоды MSFR_WG – описан в предыдущем разделе.

Анализ вероятностной структуры поля снежного покрова по данным снегомерных наблюдений в бассейне Чебоксарского водохранилища.

В работах [23, 26, 35] показано, что пространственные структурные функции запаса воды в снеге и высоты снежного покрова, построенные по данным измерений в разных физико-географических условиях, могут быть описаны степенной функцией:

$$\gamma \sim h^\alpha \quad (0 < \alpha < 2) \quad (1)$$

где $\gamma(h) = \frac{1}{2} \sigma^2 [\varepsilon(h)]$, $\sigma^2[\]$ – дисперсия, $\varepsilon(x, x+h) = [S(x) - S(x+h)] = \varepsilon(h)$, $S = S(x)$ – искомая характеристика снежного покрова, x – пространственная координата

Случайное поле со степенной структурной функцией (1) является стохастическим фракталом и обладает свойством самоподобия. Фрактальная размерность D_2 определяется по показателю степени структурной функции α , как [20]

$$D_2 = 3 - 0,5\alpha. \quad (2)$$

В [35] обобщены данные о структурных функциях полей снегозапасов на территориях с линейными размерами от 3 до 100 км и показано, что величины фрактальной размерности для этих данных составляют $D_2 = 2,6 \div 2,8$. Близкие результаты ($D_2 = 2,66 \div 2,92$) получены для полей максимальных снегозапасов по многолетним данным

снегомерных наблюдений в пределах 6 регионов площадью от 20 тыс. до 100 тыс. км², расположенных в разных частях Европейской России и в Восточной Сибири. Как показано в [35], принятие гипотезы самоподобия поля снежного покрова позволяет рассчитать дисперсию снегозапасов на подсеточных областях гидрологических моделей с распределёнными параметрами.

Структурные функции среднемесячных (за январь, февраль и март) значений снегозапасов и высоты снега были построены по данным снегомерных наблюдений за 46 лет (1966–2011) на 15-ти метеорологических станциях, расположенных в бассейне Чебоксарского водохранилища. Показано, что для обеих характеристик снежного покрова структурные функции аппроксимируются степенными зависимостями, т.е. дисперсия разности этих характеристик в разных точках поля растёт с увеличением расстояния между этими точками на всём диапазоне расстояний в пределах рассматриваемой территории. При этом изменения показателя степени α от месяца к месяцу незначительны: $0,48 \div 0,65$ для снегозапасов и $0,86 \div 1,04$ для высоты снега. Соответствующие значения фрактальных размерностей, рассчитанные по формуле (2), $D_{\text{SWE}}(\text{факт})=2,76 \div 2,67$, а для поля высоты снежного покрова $D_{\text{depth}}(\text{факт})=2,57 \div 2,48$. В целом, полученные результаты соответствуют высказывавшимся ранее предположениям о фрактальных свойствах полей характеристик снежного покрова в отдельных регионах. Разработанная динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова предназначена для описания этих свойств.

Результаты динамико-стохастического моделирования корреляционной структуры поля снежного покрова.

С помощью динамико-стохастической модели формирования снежного покрова со случайными пространственно распределёнными входами были смоделированы соответствующие современному климату поля среднесуточных значений метеорологических переменных длиной 1000 лет и рассчитаны соответствующие поля среднесуточных значений характеристик снежного покрова (запаса воды в снеге и его высоты). Качество моделирования оценивалось с помощью двух проверочных процедур.

Вначале по смоделированным рядам для каждой метеорологической станции оценивались безусловные средние значения харак-

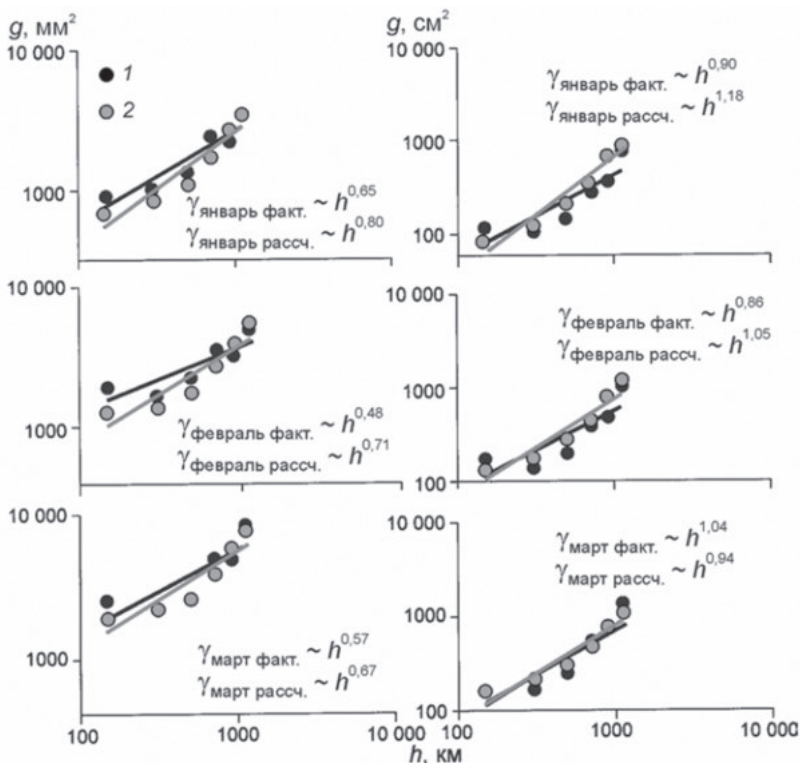


Рис. 6. Структурные функции среднемесячных величин снегозапасов (слева) и высоты снежного покрова (справа), рассчитанные по данным наблюдений (чёрные точки) и по динамико-стохастической модели (серые точки)

теристик снежного покрова, которые сравнивались с соответствующими средними, оценёнными по имеющимся рядам снегомерных наблюдений на этих станциях. Оценивались средние значения среднемесячных и максимальных за месяц характеристик для четырёх месяцев (с декабря по март) устойчивого залегания снежного покрова на рассматриваемой территории.

Среднеквадратическая ошибка расчёта снегозапасов, как средних, так и максимальных, не превышает 11 мм за все рассматриваемые месяцы. Наибольшая систематическая погрешность расчёта снегозапасов была выявлена в декабре – до 7 мм. В другие месяцы абсолютные погрешности снижаются и не превышают 3% от соответствующих средних значений. Погрешность расчёта высоты снега

за все месяцы не превышает $-2,5$ см (меньше 10% от соответствующих средних значений). Приведённые величины погрешности расчётов лежат, в большинстве случаев, в пределах точности измерения соответствующей характеристики

Вторая проверочная процедура заключалась в сравнении пространственных структурных функций среднемесячных величин снегозапасов и высоты снега, рассчитанных по данным наблюдений, с соответствующими величинами, определёнными по смоделированным рядам характеристик снежного покрова. Результаты сравнения показаны на рис. 6. Видно, что с помощью разработанной динамико-стохастической модели удалось рассчитать поля искомым характеристик снежного покрова, структурные функции которых близки к функциям фактических полей и также хорошо аппроксимируются степенной функцией (1). Фрактальные размерности рассчитанных полей среднемесячных снегозапасов варьируют в диапазоне $D_{SWE}(\text{модель})=2,67 \div 2,60$, а для поля высоты снежного покрова $D_{\text{depth}}(\text{модель})=2,53 \div 2,41$, что близко к значениям, полученным по фактическим данным и приведённым в предыдущем разделе.

Применение динамико-стохастической модели для оценки пределов предсказуемости гидрологических процессов (на примере динамики влагозапасов мёрзлой почвы)

Исследование предсказуемости динамики природных систем – традиционная задача для многих геофизических дисциплин. В метеорологии, например, такие исследования опираются на развитые в классических работах Э. Лоренца [38] представления о двух типах предсказуемости: предсказуемости первого рода, обусловленной внутренней неустойчивостью атмосферных процессов, их высокой чувствительностью к малым возмущениям начальных условий, и предсказуемости второго рода, связанной с изменчивостью внешних по отношению к атмосфере воздействий (океан, поверхность суши). Изучение физических механизмов и факторов предсказуемости, определение её пределов в зависимости от пространственно-временных масштабов исследуемых процессов, идентификация потенциально предсказуемых структур – эти и другие задачи научной метеорологии решаются на базе развитых уже полвека назад представлений об анализе предсказуемости как проблеме математической физики (см., например, [5]).

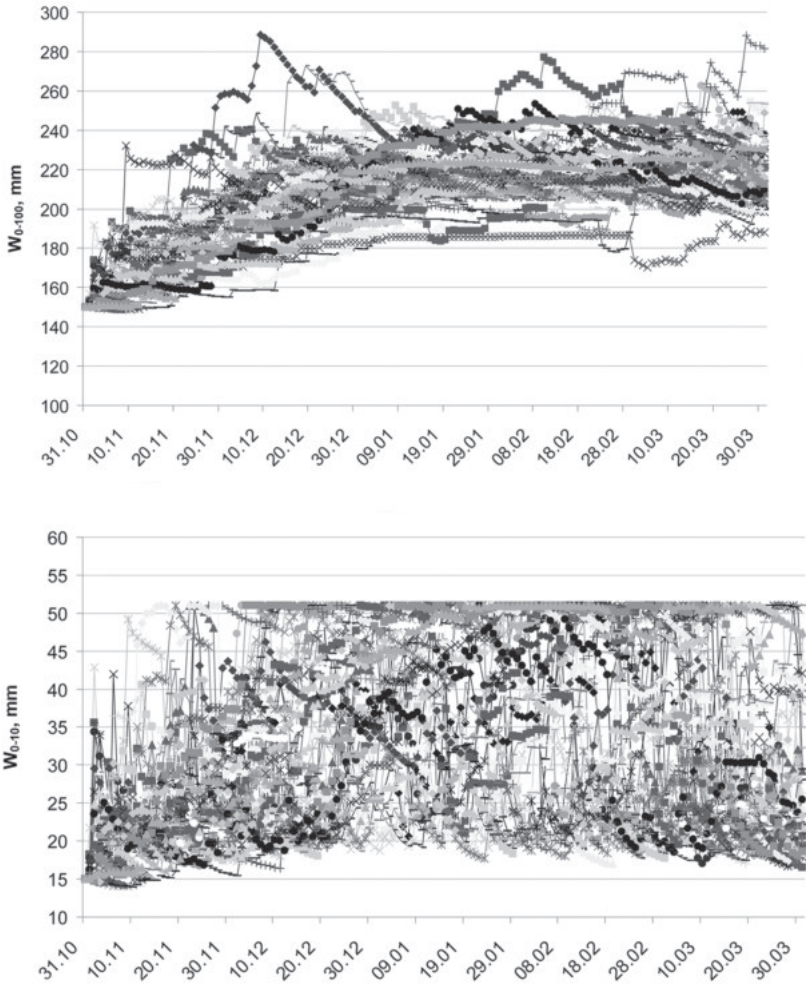


Рис. 7 Ансамбль траекторий значений суммарного влагосодержания (мм) метрового (слева) и верхнего 10-см (справа) слоев промерзающей почвы, рассчитанных при одинаковых начальных ($W(z, 0)=0,15$; $T(z, 0)=3^{\circ}\text{C}$) и смоделированных методом Монте-Карло граничных условиях

В гидрологии суши понятие предсказуемости на протяжении многих лет ассоциируется, как правило, с возможностью построения методики оперативного прогноза, соответствующего заданным критериям точности и заблаговременности (см., например, [47]). Такое понимание предсказуемости близко к принятому в метеоро-

логии понятию «эффективной предсказуемости» [28] или прогнозируемости («forecastability»), которая зависит, в том числе, от субъективных факторов, включая опыт и методические предпочтения разработчиков, особенности имеющейся сети наблюдений и т.п. Интерес к анализу предсказуемости, как объективному свойству гидрологической системы, возник в последние годы и связан, прежде всего, с исследованиями макромасштабной изменчивости характеристик влажности почвы и снежного покрова, направленными на углубление представлений о вкладе низкочастотной изменчивости этих характеристик в динамику климатической системы [46]. Кроме того, появились публикации, в которых исследуются факторы, влияющие на предсказуемость гидрологических процессов в масштабах речного бассейна, такие как: пространственное усреднение процессов [24], нелинейность гидрологических систем [49], гидравлические свойства бассейна [37]. Есть основания полагать, что построение концептуальных основ анализа предсказуемости гидрологических систем становится одной из ключевых проблем научной гидрологии [22].

Возможности создания методов изучения физических механизмов и оценки предсказуемости гидрологических систем связаны с использованием достижений в области динамико-стохастического моделирования. Ниже показано, как такие возможности могут быть реализованы на примере оценки предсказуемости влагосодержания мёрзлой почвы – основного фактора потерь талого стока при формировании весеннего половодья в бассейнах равнинных рек с преимущественно снеговым питанием (по работе [2]).

Динамико-стохастическая модель неизотермического влагопереноса в мёрзлой почве.

В структуре разработанной динамико-стохастической модели объединены два компонента: (1) физико-математическая модель вертикального влагопереноса в мёрзлой почве учётом накопления и таяния снежного покрова на её поверхности и (2) точечный стохастический генератор погоды.

Физико-математическая модель основана на решении системы нелинейных уравнений тепло- и влагопереноса и описывает гидротермический режим почвы в процессе её промерзания, оттаивания и инфильтрации талой воды с учётом фазовых переходов вода-лёд,

влияния переохлажденной влаги. Используемая система уравнений и методы их численного интегрирования, результаты испытаний модели по данным лабораторных и натурных экспериментов Гидрофизической лаборатории Государственного гидрологического института и натурных наблюдений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции описаны в [29]. Используемый точечный стохастический генератор погоды, позволяющий воспроизводить методом Монте-Карло многолетние искусственные последовательности метеорологических переменных суточного разрешения в заданной точке (без учёта пространственных связей между метеорологическими переменными) описан в [1]. Там же подробно даны результаты калибровки и тестирования точечного генератора погоды по данным метеорологических измерений на территории лесостепной зоны ЕТР.

Оценка пределов предсказуемости: организация и результаты численных экспериментов.

Численные эксперименты для оценки потенциальной предсказуемости влагозапасов почвы в осенне-зимний период проводились с использованием данных наблюдений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции и были организованы следующим образом.

Расчёты велись для периода с 1 ноября по 31 марта. Начальные условия для решения уравнений тепло- и влагопереноса задавались в виде постоянных по глубине метровой почвенной колонки значений суммарной (жидкая вода + лёд) влажности и температуры. С помощью стохастического генератора погоды моделировался ансамбль из 1000 реализаций значений метеорологических переменных суточного разрешения за период с 1 ноября по 31 марта. Температура воздуха, осадки и рассчитанное по влажности воздуха испарение почвенной влаги задавались в качестве граничных условий для расчётных уравнений тепло- и влагопереноса при отсутствии снега. При наличии на поверхности почвы снежного покрова (его характеристики рассчитывались по сгенерированным метеорологическим «входам» с помощью однослойной модели, представленной в предыдущем разделе) граничные условия задавались в виде потоков тепла и влаги на границе снег-почва.

В результате с помощью динамико-стохастической модели был рассчитан ансамбль из $N=1000$ траекторий изменения суточных зна-

чений влажности $W_{ijk}=W_k(z_i, t_j)$ и температуры почвы $T_{ijk}=T_k(z_i, t_j)$ на разных глубинах в период с 1 ноября по 31 марта (здесь k – номер расчётной траектории, $k=1, 2, \dots, N$; z_i – i -й расчётный 10-см слой по глубине метровой почвенной колонки от её поверхности; $i=1, 2, \dots, 10$; $z_i=[10(i-1); 10i]$ [см]; t_j – j -й суточный интервал времени от начала расчётов $j=1, 2, \dots, 151$; $t_j=[(j-1); j]$ [сут]). Каждая из 1000 траекторий рассчитывалась при заданных (одинаковых для всех расчётов) начальных условиях и случайных, смоделированных методом Монте-Карло, граничных условиях. Рассчитанные траектории изменения суммарного влагосодержания верхнего 10-см слоя почвы при постоянной по глубине z начальной объёмной влажности, равной 0,15 и температуре почвы, равной 3°C, показаны на рис. 7 (в качестве примера показаны 50 из 1000 траекторий).

Для каждого расчётного шага t_j и почвенного слоя z_i рассчитывалось среднеквадратическое по ансамблю $N=1000$ траекторий отклонение $\sigma_{ij}(W)$ влажности почвы:

$$y_{ij}(W) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (W_{ijk} - \bar{W}_{ij})^2 \times (N-1)^{-1}}, \quad (3)$$

где $\bar{W}_{ij} = N^{-1} \sum_{k=1}^N W_{ijk}$ – среднее по ансамблю траекторий значение влажности почвы в слое z_i и на временном шаге t_j .

Величина $\sigma_{ij}(W)$ задавалась в качестве вероятностной меры, по времени сходимости которой к устойчивому значению определялась потенциальная предсказуемость влажности почвы. Горизонт потенциальной предсказуемости $\Delta_i(W)$ влажности почвенного слоя z_i оценивался из условия:

$$\Delta_i = \min(j) : \left| \frac{y_{ij} - y_{i(j-1)}}{y_{ij}} \right| \leq \alpha, \quad j=1, 2, \dots, 151 \quad (4)$$

На рис. 8 показано, как меняется величина $\sigma_{ij}(W)$ по мере удаления от начальной расчётной даты расчёта (1 ноября) при разных начальных условиях (на примере суммарных влагозапасов метрового слоя промерзающей почвы).

Оказалось, что предел предсказуемости суммарных влагозапасов почвенной колонки, рассчитанный по формуле (4) при $\alpha=1\%$, меняется в довольно узком диапазоне – от 31 до 42 суток, при заданных значительных изменениях начальных условий ($W(z, 0)=0,15 \div 0,25$;

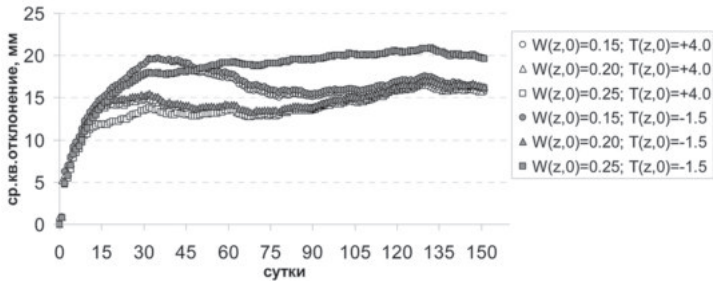


Рис. 8. Изменение среднеквадратического по ансамблю 1000 траекторий отклонения рассчитанной влажности метрового слоя промерзающей почвы по мере удаления от начальной расчётной даты расчёта (1 ноября) при разных начальных условиях

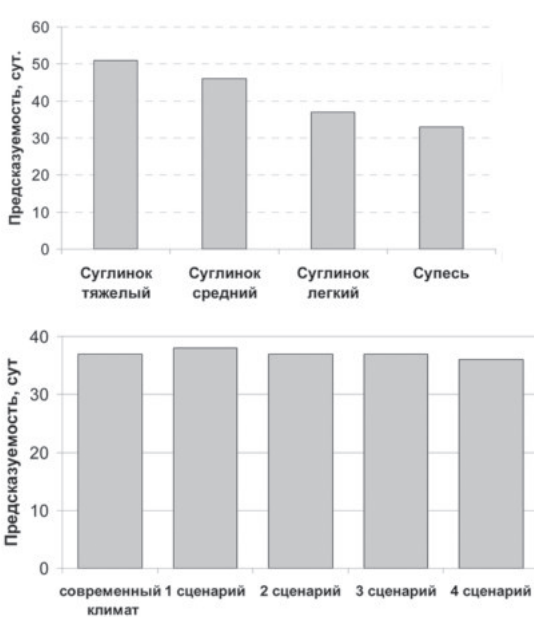


Рис. 9. Предсказуемость влагозапаса метрового слоя промерзающей почвы в зависимости от её механического состава (слева) и климатических норм (справа) температуры воздуха T_{α} и осадков P : (сценарии: 1 – T_{α} увеличена на 2°C; 2 – T_{α} – на 1°C; 3 – P увеличена на 10%; 4 – P – на 20%)

$T(z, 0) = -1,5 \div +4^{\circ}\text{C}$). В целом полученные оценки предсказуемости запаса влаги для отдельных 10-см слоёв промерзающей почвенной колонки показали, что предсказуемость растёт с увеличением глубины слоя: для нижнего слоя 90–100 см предсказуемость достигает 74 суток.

Проведены две серии численных эксперимента по оценке чувствительности рассчитанного предела предсказуемости запаса влаги метрового слоя промерзающей почвы: (1) к изменениям её механического состава, влияющего на гидравлические и теплофизические параметры уравнений тепло- и влагопереноса, а также (2) к изменениям климатических норм температуры и осадков, задаваемых в качестве параметров стохастического генератора погоды. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 9. Проведённые эксперименты показали, что предсказуемость влагозапаса метрового слоя промерзающей почвы растёт для почв более тяжёлого механического состава, достигая для тяжёлого суглинка 51 суток. Вместе с тем, изменения климатических характеристик не оказали заметного влияния на предел предсказуемости влагозапаса почвы.

Таким образом, важным свойством рассматриваемой системы является то, что её предсказуемость зависит от внутренних свойств системы в большей степени, чем от характеристик вынуждающего процесса. Аналогичный результат для линейной динамико-стохастической системы получен аналитически в работе [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М., Наука, 2007. 294 с.
2. Гельфан А.Н. Оценка предсказуемости гидрологических процессов. // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, Т. 2, 2015. С. 100–109
3. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования // Лёд и Снег, Т. 55, №4, 2015. С. 61–72
4. Демченко П.Ф., Кислов А.В. Стохастическая динамика природных объектов: броуновское движение и геофизические приложения. М., ГЕОС, 2010. 189 с.
5. Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М., ИВМ РАН, 2007. 283 с.
6. Каган Р.Л. Осреднение метеорологических полей. Л., Гидрометеоздат, 1979. 212 с.
7. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М., 2008. 394 с.
8. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Совместное использование детерминистического и вероятностного подходов к расчетам характеристик максимального стока // Метеорология и гидрология, №6, 2010. С. 74–86

9. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. () Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока // Метеорология и гидрология, №2, 2009. С. 54–67

10. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология, №2, 2007. С. 83–95

11. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М., Наука, 1993. 104 с.

12. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. () Динамико-стохастические модели формирования дождевого и талого стока // Водные ресурсы, №4, 1991. С. 5–14.

13. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М., Наука, 1983. 216 с.

14. Морейдо В.М. Разработка методов ансамблевого прогноза характеристик сезонного речного стока (на примере притока воды в Чебоксарское водохранилище). Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук: 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия / ИВП РАН, Москва, 2015. 185 с.

15. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах: 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы, 43(3), 2016. С. 243–253.

16. Мотовилов Ю.Г. Моделирование снежного покрова и снеготаяния // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов / Под ред. Кучмент Л.С., Музылев Е.Л. М., Изд-во НГК РАН, 1993. С. 9–37.

17. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л., Гидрометеиздат, 1989. 358 с.

18. Решение совместного заседания НТС Росгидромета, Научного совета РАН «Исследования по теории климата Земли» и НТС Росводресурсов по вопросу «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации», Москва, 20 января 2014 г. / В кн.: «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. Сборник докладов». М.: Росгидромет, 2014. 207 с.

19. Сванидзе Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. Л., Гидрометеиздат, 1977. 311 с.

20. Федер Е. Фракталы. М., Мир, 1991. 261 с.

21. Abbott M.B, Bathurst J.C, Cunge J.A, O'Connell P.E, Rasmussen E. An introduction in European hydrological system – Systeme Hydrologique Europien SHE. Journal of Hydrology. 87, 1986. P. 45–77.

22. Blöschl G. Hydrologic synthesis: Across processes, places, and scales, Water Resources Research, 42, 2006. W03S02, doi:10.1029/2005WR004319.

23. Blöschl G., Kirnbauer R. An analysis of snow cover patterns in a small alpine catchment // Hydrological Processes. V.6, 1992. P. 99–109.

24. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: A review, Hydrol. Processes, 9, 1995. P. 251–290

25. Borsch S., Simonov Y. Operational Hydrologic Forecast System in Russia. In *Flood Forecasting A Global Perspective* (Edited by: Thomas A. Adams and Thomas Pagano), Chapter 7, 2016. P. 169–181
26. Cline DW, Bales RC, Dozier J. Estimation the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling. // *Water Resources Research*. V34, 1998. P. 1275–1285.
27. Day G N () Extended streamflow forecasting using NWS-RFS J. *Water Resour. Planning Manage.* 111, 1985. P. 157–170
28. Douville H. Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study. *Climate Dynamics*. 34(6), 2010. P. 797–818
29. Gelfan A.N. Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parametrization by basic soil data, in: Sivapalan M. et al. (Eds), *Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress*. IAHS Publ. 303: Foz do Iguazu, Brazil, 2006. P. 293–304.
30. Gelfan A., Moreydo V. and Motovilov Y. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary reservoir under the differently constructed weather scenarios, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2017. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-389>, in review, 2017.
31. Gelfan A., Motovilov Y., Moreido V. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir. *Proc. IAHS*, 369, 2015. P. 115–120, proc-iahs.net/369/115/2015/ doi:10.5194/piahs-369-115-2015
32. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Assessment of extreme flood characteristics based on a dynamic-stochastic model of runoff generation and the probable maximum discharge. *Journal of Flood Risk Management* 4, 2011. P. 115–127 10.1111/j.1753-318X.2011.01096.x
33. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Long-term probabilistic forecasting of snowmelt flood characteristics and the forecast uncertainty In: E. Boegh et al., (Eds.) *Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management* (Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007). IAHS Publ. 313, 2007. P. 213–221
34. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Estimation of extreme flood characteristics using physically based models of runoff generation and stochastic meteorological inputs. *Water International*, 27(1), 2002. P. 77–86.
35. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Statistical self-similarity of spatial variations of snow cover: verification of the hypothesis and application in the snowmelt runoff generation models. // *Hydrol. Processes*. V.15(18)? 2001. P. 3343-3355.
36. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Dynamic-stochastic models of rainfall and snowmelt runoff formation. *J. Hydr. Sci.* V. 36. N2, 1991. P. 153–169.
37. Kumar P. Typology of hydrologic predictability. *Water Resources Research*, 47, 2011. W00H05, doi:10.1029/2010WR009769.
38. Lorenz E.N. Climatic predictability, in *The Physical Basis of Climate and Climate Modelling*, edited by B. Bolin et al., GARP Publ. Ser., vol. 16, pp. 132–136, World Meteorol. Organ., Geneva, Switzerland, 1975
39. Marsh P. Snowcover formation and melt: recent advances and future prospects. *Hydrol. Process.* 13, 1999, P. 2117–2134.

40. Massart P. The tight constant in the Dvoretzky–Kiefer–Wolfowitz inequality, *The Annals of Probability*, 18 (3), 1990. P. 1269–1283, MR 1062069, doi:10.1214/aop/1176990746

41. Morris E.M. Modeling the flow of mass and energy within a snowpack for hydrological forecasting. *Ann. Glaciology*. 4, 1983. P. 198–203

42. Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series, No 105, 1999.

43. Pappenberger F. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe. In: *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*, Duan et al. (Eds), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016. P. 1–35, DOI 10.1007/978-3-642-40457-3_47-1

44. Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T., Hedstrom N.R., Quinton W.L., Granger S.K., Carey S.K. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes*. 21, 2007. P. 2650–2667. DOI: 10.1002/hyp.6787.

45. Refsgaard J.C., Storm B. MIKE SHE., in: V.P. Singh (ed.), *Computer models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Colorado, USA, 1995. P. 809–846.

46. Report of a Workshop on Predictability & Limits-To-Prediction in Hydrologic Systems Nation. Acad. Press, Washington, D.C. 2002.138 p.

47. Shukla S., Sheffield J., Wood E.F., Lettenmaier D.P. On the sources of global land surface hydrologic predictability. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 2013. 1987–2013.

48. Singh V.P., Woolhiser D.A. Mathematical modeling of watershed hydrology. *J. Hydrol. Eng.*, 7(4), 2002. P. 270–292.

49. Zehe E., Elsenbeer H., Lindenmaier F., Schulz K., Blöschl G. Patterns of predictability in hydrological threshold systems. *Water Resources Research*, 43, 2007. W07434, doi:10.1029/2006WR005589.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ, ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

Проблемы и современные исследования гидродинамики и ледотермики русловых потоков

*В.К. Дебольский, Е.И. Дебольская, Е.Н. Долгополова, О.Я. Масликова,
И.И. Грицук, Д.Н. Ионов*

Лаборатория динамики русловых потоков и ледотермики – одна из старейших в Институте водных проблем. Она стала преемником отдела гидрофизики, образованного одновременно с созданием института. Первыми руководителями отдела были К.И. Россинский и Б.А. Фидман, чьи основополагающие работы послужили фундаментом всех дальнейших исследований, проводимых в лаборатории.

Основными направлениями работы лаборатории с момента её образования были и остаются до сегодняшнего дня исследования русловых процессов и транспорта наносов, речной турбулентности, ледовых процессов на водоёмах и водотоках суши, динамики дельт. Новым направлением стало исследование деформаций русел и берегов водных объектов криолитозоны.

Основой теоретического анализа и математического моделирования как главных методов фундаментальных исследований, присущих академической науке, должны быть данные наблюдений и экспериментов. Поэтому с самого начала деятельности лаборатории её сотрудниками значительное время исследований отводилось полевым и лабораторным работам. За прошедшие годы были проведены экспедиции по различным тематикам в бассейнах российских рек.

Исследования речной турбулентности

Активные исследования динамики речных течений были начаты в 1968 г. под руководством Фидмана. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований вошли в книгу Фидмана «Турбулентность водных потоков», изданную после кончины автора по его плану. Глава «Речные течения» содержит обобщение методов расчёта параметров русловой турбулентности и результатов экспериментальных исследований структуры натуральных потоков, проведённых под руководством Фидмана и В.К. Дебольского. На основе

обобщения теоретических положений теории турбулентности и результатов натуральных и лабораторных исследований в дальнейшем была разработана статистическая модель турбулентного потока, некоторые аспекты которой приводятся в сборнике ИВП РАН [2]. В модели рассчитываются первые четыре статистических момента скорости турбулентного речного потока: средняя скорость, дисперсия средней скорости, коэффициенты асимметрии и эксцесса. Развита метод моментов Пирсона для построения распределения случайной величины по её первым четырём статистическим моментам. Анализ многочисленных результатов экспериментов в лабораторных и речных потоках позволил построить трёхслойную модель течения для расчётов распределения третьего и четвёртого моментов и показать, что распределение пульсаций продольной составляющей скорости в придонной области существенно отличается от Гауссовского, здесь с большей вероятностью реализуются пульсации скорости, превышающие среднюю величину. Этот вывод очень важен при описании взаимодействия потока с частицами наносов и загрязняющих веществ на дне. Вблизи поверхности распределение пульсаций продольной составляющей скорости практически не отличается от нормального, что позволило получить простые формулы для расчёта распространения примеси по поверхности природного потока.

Разработанная модель природного потока использовалась в последующих исследованиях для разработки методов расчёта переноса загрязняющих веществ в реках и каналах, изучения условий начала движения наносов, оценки преобразований энергетических характеристик в речном потоке, изучения формирования пограничных слоёв в и слоёв смешения в подлёдных течениях, исследования влияния льда на напряжение трения на дне и на условия жизни биоты и т.д.

Активное использование водных ресурсов вызывает необходимость оценивать скорость переноса и трансформации загрязняющих веществ и прогнозировать возможности самоочищения водных объектов. Перенос примеси существенно зависит от интенсивности турбулентности руслового потока. Хотя коэффициент турбулентной диффузии K невелик, и турбулентный перенос примеси мал по сравнению с адвективным переносом, он играет большую роль в

жизни рек и водохранилищ. Турбулентная диффузия является одним из механизмов передачи кислорода в придонной области потока. Также вопрос о величине и распределении K по глубине потока встаёт при оценке времени разбавления сточных вод до неопасной концентрации.

Например, с помощью математического моделирования турбулентной диффузии в природном течении шириной B и глубиной h , при неполной автомодельности потока в приближении плоского потока ($h/B \ll 1$), Е.Н. Долгополовой [31] получено выражение для распределения коэффициента турбулентного переноса по глубине, зависящее от средних характеристик течения:

$$K_y = \frac{\kappa^2 \langle u \rangle h n (1 - y/h)}{(1+n)(y/h)^{n-1}}, \quad (1)$$

где y – вертикальная координата, $\langle u \rangle$ – средняя по глубине скорость течения на данной вертикали, n – показатель степени, зависящий от Re_* , κ – постоянная Кармана.

Или нормируя K'_y на $\langle u \rangle h \kappa n$ получим выражение

$$K''_y = \frac{\kappa(1 - y/h)}{(1+n)(y/h)^{n-1}}, \quad (2)$$

При изменении n в диапазоне $n=0,1-0,3$ коэффициент K''_y (рис. 1) можно считать универсальным для потоков в реках.

Формирование турбулентных слоёв смешения исследовалось в устьях разных рек, где происходит взаимодействие речных и морских, особенно при большой величине прилива или морских нагонах. Определены характеристики эстуариев необходимые для образования внутренних волн, способствующих проникновению осо-

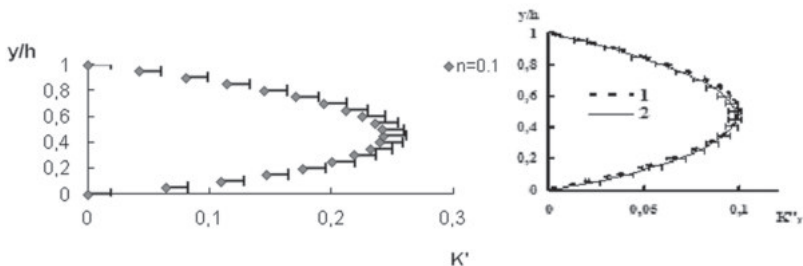


Рис. 1. Универсальное распределение по глубине коэффициента турбулентной диффузии, полученного в [32], и рассчитанного из выражений (1) и (2)

лонённых вод в устье реки, распространению прилива в виде бора [22, 23].

Подлёдная турбулентность

Турбулентная диффузия играет важную роль в процессах массо- и теплопереноса в подледных потоках, а также при весеннем таянии льда на озёрах и водохранилищах. При её расчётах в первом приближении часто подлёдное течение рассматривается, как состоящее из двух слоёв, сформированных дном и нижней поверхностью льда, движение жидкости в каждом из этих слоёв описывается уравнением для плоского потока. Границей между этими потоками можно считать линию максимальной средней скорости. Известно, что ни логарифмический, ни степенной закон, которые описывают распределение средней скорости по глубине потока, не дают нулевых градиентов скорости в точке, где скорость максимальна. Тем не менее, был предложен метод расчёта гидравлического сопротивления и распределения коэффициента турбулентного переноса по глубине подлёдного потока при условии, что разрывом производной скорости на границе сопряжения потоков можно пренебречь и описать профиль скорости в каждом потоке степенным законом с показателями степени, характеризующими соответственно шероховатости дна и нижней поверхности льда [30]. Полученное распределение дисперсии продольной составляющей скорости потока по глубине свидетельствует о том, что в подлёдном потоке формируется слой смешения между придонным потоком и потоком у нижней поверхности льда. Анализ распределений асимметрии и эксцесса по глубине подлёдного потока показал, что распределение пульсаций продольной составляющей скорости не удовлетворяет нормальному закону. Более вероятны пульсации, превышающие величину средней скорости и сосредоточенные в гораздо более узком диапазоне, чем при нормальном распределении. Полученные результаты привели к выводу, что подлёдный поток необходимо рассматривать как взаимодействие двух пристеночных пограничных слоёв. В последние десятилетия в силу развития технической базы стало возможно более подробно изучить внутреннюю структуру турбулентности в пограничном слое у стенки, выделить когерентные структуры и описать динамику их развития, связав с классической картиной осреднённого поля скорости. Существенное внимание

в последнее время уделялось проблеме определения коэффициента турбулентного обмена в плоскости нулевых касательных напряжений, представляющей собой характерную особенность подлёдных потоков. Неоднозначность такого определения – следствие наличия двух близко расположенных пограничных слоёв, образованных обтеканием поверхностей с разной шероховатостью.

Анализ данных измерений, проведённых в природных подлёдных потоках [7, 17], позволил предположить, что взаимодействие крупных вихревых структур может развиваться по разным сценариям. Это различие определяется такими параметрами потока, как его расход и шероховатости донной и ледовой поверхностей. Модель когерентных структур в подледном потоке (КСПП), разработанная Дебольской [7, 9], основана на двух независимых системах уравнений, которые решаются численно в разных временных масштабах. Первая система содержит уравнения движения жидкости для градиентно-вязкого режима, хорошо соответствующего течению в неглубоких потоках, уравнения переноса кинетической энергии, соотношения Прандтля и Колмогорова для связи этой энергии с масштабом турбулентности и коэффициентом турбулентного обмена. Предполагается, что получаемый при решении этой системы коэффициент турбулентного обмена остаётся постоянным в течение времени, необходимого для расчёта таких характеристик потока, как мгновенная скорость и турбулентное касательное напряжение, изменяющихся под действием всплеска на твёрдых поверхностях и рассчитываемых с помощью второй системы уравнений. Вторая система уравнений используется для расчёта поля турбулентного касательного напряжения, получающегося в результате всплесков этой величины на твёрдых поверхностях, и состоит из уравнения неразрывности и релаксационного уравнения типа Хинце. Основная цель моделирования – проверка возможности возникновения различных сценариев развития придонного и подлёдного пограничных слоёв. Это различие зависит от соотношения шероховатостей донной и ледовой поверхностей и глубины потока. Два полноценных пограничных слоя могут сосуществовать только в случае, если размер каждого меньше половины глубины потока.

Анализ данных натурных и численных экспериментов, выполненных с помощью модели (КСПП), подтвердил вывод о том, что

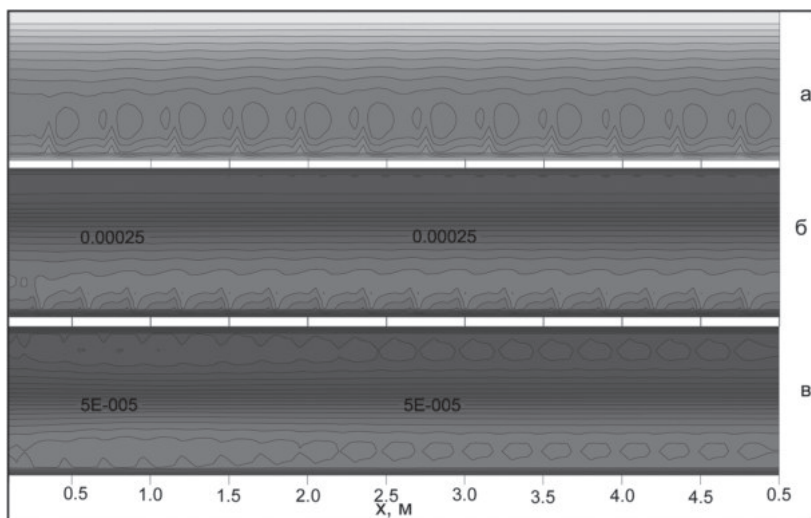


Рис. 2. Изолинии турбулентных напряжений трения, рассчитанные по модели, в плоскости $x - z$ для открытого потока (а) и потоков с гладким (б) и шероховатым (в) покрытием

существуют две системы крупномасштабных вихрей в погранслоях, образованных при обтекании донной и ледовой поверхностей. При взаимодействии двух пограничных слоёв существенную роль играет различие в шероховатости обтекаемых поверхностей. Если поток имеет глубину, недостаточную для полного развития двух пограничных слоёв, между ними может возникнуть конкуренция. При этом крупномасштабные вихри или когерентные структуры, образуемые у одной поверхности, будут препятствовать развитию столь же крупных вихрей у противоположной поверхности, как бы сворачивая их. На рис. 2 представлены распределения турбулентных напряжений трения соответственно для трёх потоков (открытого – а, подлёдного со смоченным льдом – б и подлёдного с шероховатым льдом – в). Из рисунков видно, что в открытом потоке развивается одна система вихрей, образующихся на дне, в потоке со смоченным льдом образующиеся структуры на поверхности льда выражены незначительно, в потоке с шероховатым льдом, структуры, формирующиеся на поверхности льда и дна почти равнозначны.

Исследования ледовых процессов

Для решения проблем, связанных с использованием водных ресурсов поверхностных водных объектов, особенно в зимних условиях, в силу особенностей географического расположения РФ необходимо наличие возможно более полной информации о ледовых процессах в реках и водоёмах; ведь большая часть из них значительный период года (иногда до 9 месяцев, например – Обская губа) покрыта льдом. Начальная стадия формирования ледяного покрова и его разрушение в период ледохода часто вызывают катастрофические подьёмы уровней воды. На территории РФ в целом ряде регионов (Архангельская и Вологодская области, Якутия, Иркутская область и др.) зимние наводнения, спровоцированные ледовыми заторами, происходят ежегодно, а наносимые ими ущербы весьма ощутимы не только для местных, но и для федерального бюджетов. За весь период существования Института водных проблем РАН исследования ледовых процессов постоянно развивались. Эти исследования носили как фундаментальный, так и прикладной характер. Обобщены данные по ледовым затруднениям на территории РФ, разработаны методики прогнозирования возможных катастрофических ситуаций в зимний период, связанных с распространением загрязняющих веществ в водотоке при активных ледовых явлениях [20]. Особое внимание уделялось измерениям на натуральных объектах гидродинамических характеристик подлёдных потоков, что явилось основой для параметризации турбулентности этих потоков и создания математических моделей взаимодействия потока с ледяным покровом.

Использование математического моделирования при исследовании динамики подлёдных потоков выдвигает целый ряд жёстких требований к постановке задачи, умению чётко определять временные и пространственные масштабы процессов. Эти требования, прежде всего, необходимы для того, чтобы оптимально выбрать размерность модели и используемые уравнения.

В рамках гидравлического или одномерного приближения могут быть решены задачи, в которых учтено лишь основное отличие подлёдных и открытых потоков – наличие дополнительного сопротивления. При решении таких задач можно получить изменение интегральных характеристик, таких как расходы или средние по сечению

скорости и глубины потоков. Тем не менее, именно этот класс задач позволяет делать прогнозы о динамике ледяного покрова (его деформациях и возможных разрушениях), так как временные и пространственные масштабы механических изменений льда соответствуют масштабам изменения интегральных характеристик потока [7].

Заторы. Исследования криолитозоны

Одно из главных направлений исследований, проводимых в лаборатории, – изучение гидрофизических и гидрологических процессов в криолитозоне. Актуальность этого направления обусловлена, прежде всего, тем, что расположение в зоне многолетнемерзлых пород (ММП) является серьёзным фактором риска повреждения плотин и деформаций берегов водохранилищ и нижних бьефов гидротехнических сооружений. Глобальные климатические изменения, происходящие в последние десятилетия, существенным образом влияют на гидрологические и термодинамические процессы в гидросфере Земли и, особенно, в криолитозоне, поскольку сдвиги сроков и частоты перехода температуры окружающей среды через 0°C запускают фазовые переходы в системе вода–лёд в моменты, являющиеся аномальными для конкретных северных территорий. Не устойчивые к смене температуры мерзлые породы способны легко переходить в талое состояние и наоборот – из талого в мерзлое, что сопровождается развитием целого ряда неблагоприятных и опасных геокриологических процессов, а также негативными изменениями экологической обстановки. Климатические изменения в совокупности с хозяйственной деятельностью человека и развернувшимся в криолитозоне обширным гидротехническим строительством приводят к нарушениям в гидрологическом балансе сети северных рек. Оттаивание ММП, помимо проблем с гидротехническим и инженерным строительством, оказывает огромное влияние на деструктивные процессы берегов водных объектов, особенно в районах с максимальной льдистостью. Из чрезвычайно стабильной системы мерзлота превращается в уязвимую и неустойчивую.

Появление новых кратеров, обвалов и больших котлованов (например, обнажение Ледяная гора в 120 км южнее Игарки, Иннокентьевское в устье Енисея, кратер Батагайка неподалеку от бассейна реки Яна) – это наглядное свидетельство того влияния, которое

климатические изменения оказывают на деформационные процессы в водных объектах, расположенных в районах многолетней мерзлоты.

Поскольку потепление климата вызывает повсеместное таяние снега и льда, альbedo изменяется. Вместо того, чтобы отражать солнечный свет, пейзаж начинает поглощать больше тепла, чем это было ранее, что ещё больше увеличивает тенденции потепления и таяния в этом районе.

Воздействие гидротехнических сооружений на русла в криолитозоне – проблема, для решения которой необходимо не только проведение изыскательских работ, но и привлечение современных возможностей математического моделирования. В каждом конкретном случае, в соответствии с особенностями мерзлотно-геологических, геоморфологических и гидрологических условий, проявляются те или иные реакции речной системы на гидротехнические сооружения. Главные из них – это русловые деформации на участке нижнего бьефа, изменения термического, ледового и паводкового режимов, а также изменения естественного хода уровня водной поверхности и твёрдого расходов в различных временных масштабах (суточном, сезонном, многолетнем). Систематические натурные исследования с получением кондиционного фактического материала по этой проблематике в криолитозоне практически не проводились. Трудности с прогнозированием деформаций русел, сложенных ММП, связаны с невозможностью проведения натурных наблюдений в период развития наводнений. Исследование этого сложного и многофакторного процесса может быть выполнено с достаточной степенью адекватности лишь с помощью математического моделирования.

В целях изучения природы деструктивных криогенных береговых процессов и влияния этих процессов на экологию окружающей среды лабораторией динамики русловых процессов и ледотермики разработана модель разрушения берегов северных водоёмов под действием таких факторов, как повышение температуры окружающей среды, солнечная радиация и связанное с ней снеготаяние. Основой математической модели послужили данные лабораторных экспериментов [3]. Существенной особенностью формирования поверхностного стока, ответственного за переформирование русла в



Рис. 3. Схема распределения потоков жидкости при оттаивании мёрзлых грунтов

условиях криолитозоны и в период сезонных изменений температур, является тот факт, что в почве присутствуют потоки воды, образованные при оттаивании мёрзлой породы. В связи с этим гидравлическая проводимость почвы изменяется.

Модель состоит из нескольких взаимосвязанных между собой блоков, представленных на рис. 3. В условиях оттаивания породы происходит перераспределение долей в каждом блоке, а именно: увеличивается доля талых потоков, при этом изменяется влагоудерживающая способность для данного вида почв. Как следствие, изменяется возможная инфильтрация в грунт, что в свою очередь приводит к тому, что доля склоновых потоков также изменяется во времени. По окончании оттаивания грунта процесс движения влаги внутри склона стабилизируется, и доля склоновых потоков будет зависеть только от атмосферных осадков. Были расписаны уравнения для каждого из этих блоков. Особое внимание было уделено снеготаянию под действием конвективных и радиационных потоков.

В процессе работы были получены важные выводы о том, что русло реки в условиях криолитозоны можно моделировать как трёхслойную систему – сезонноталый слой, ММП и талик. Для каждого слоя могут быть записаны соответствующие системы уравнений термо- и гидродинамики, адекватно отражающие состояние изменения грунта и внешних условий. Наиболее сильно размывает-

ся верхний, сезонноталый слой, что объясняется большей рыхлостью и подвижностью грунта этого слоя, который подвергается воздействию не только максимальных скоростей потока на поверхности, но и влиянию внутрисклоновых, фильтрационных и дождевых потоков. Слой ММП за счёт его высокой цементированности разрушается гораздо медленнее, для него характерны другие временные интервалы (десятки и сотни лет). Слой талика часто не размывается из-за небольших придонных скоростей. Предложена система уравнений, описывающая движение породы по склонам в условиях криолитозоны с учётом интенсивности дождя и изменяющейся во времени льдистости грунта [3, 26]. При неразмывающих скоростях потока деформации склона обусловлены исключительно проседанием оттаявшего грунта и выдвигания его к центру потока [27].

На основе проведённых в лабораторных условиях исследований тающего снега и последующей инфильтрации талых потоков в грунт выделены три фазы таяния снега: аккумуляция, интенсивный сток и непрерывное таяние. При наличии дождя процесс снеготаяния имеет более сложный характер – происходит наложение нескольких процессов: фаза непрерывного таяния совмещается с фазой последующей аккумуляции. Дождь усиливает интенсивность процесса и изменяет предельное значение содержания воды в фирне во времени. Это особенно заметно при большей интенсивности дождя [4].

Исследованы различия в интенсивности воздействия на снег инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) излучения. Вся длинноволновая радиация поглощается верхним слоем снега, и ИК участок спектра несёт энергию, преобразующуюся в тепловую уже на поверхности снега [5]. Облачность является задерживающим фактором только для ИК участка спектра. Поэтому в дневные часы воздействие ультрафиолета на снеготаяние происходит при любой погоде (кроме дождливой), тогда как инфракрасное излучение действует непосредственно лишь в ясные дни. Под воздействием ИК излучения альbedo снежного покрова изменяется и достигает нулевого значения быстрее. УФ-волны практически сразу проникают вглубь снега, чем и объясняется меньшее отражение с поверхности, но альbedo под воздействием УФ-лучей уменьшается с меньшим коэффициентом экстинкции [27].

Полученные результаты исследования каждого из составляющих единого термогидродинамического процесса являются необходимой частью общего прогноза влияния изменения климата на течение деструкционных криогенных процессов в зоне ММП. Изучение этих процессов даст ответы на многие вопросы и поможет дать рекомендации относительно дальнейшей экологической, хозяйственной и строительной деятельности на территории криолитозоны.

Русловые процессы. Устья в криолитозоне

Исследования русловых процессов в лаборатории во многом основываются на работах К.И. Россинского, который сформулировал основные положения динамики русла, вывел важнейшие закономерности движения речных наносов, показал роль грядового движения наносов в формировании речных русел. Глубокая эрудиция в этой области наряду с тонким пониманием физических основ динамики реальной жидкости позволили ему в 1950-х гг. разработать эффективный метод расчёта русловых деформации в нижних бьефах гидроэлектростанций. Для научных работ Россинского всегда были характерны физическая обоснованность и ясная теоретическая трактовка при неизменной конкретной направленности конечных результатов.

Развитие и совершенствование представлений Россинского [28] о транспорте наносов и переформировании русел позволили разработать новые подходы и методы решения этой проблемы. Транспортирующая способность потоков и особенно влияние на неё нестационарности течения представляется одной из наиболее изучаемых областей гидрологии. Ведущую роль в становлении теории транспортирующей способности играли работы советских исследователей. За рубежом в последние десятилетия достаточно интенсивно развивался аппарат математического моделирования транспорта наносов и деформаций дна. Однако большинство работ в этой области науки было посвящено открытым потокам. Теоретические исследования изменения режима транспортирующей способности потоков при наступлении ледостава и особенно в условиях формирования заторов практически не проводятся, несмотря на то что решение этой проблемы может дать важные практические результаты для борьбы с предотвращением катастрофических последствий заторных наводнений. В связи с этим до сих пор был недоста-

точно развит и аппарат математического моделирования, как наиболее приемлемый метод изучения этого плохо поддающегося натурному наблюдению и лабораторному моделированию явления. При математическом моделировании транспорта наносов в открытом потоке наибольшее распространение имеют одномерные модели, основанные на применении системы уравнений движения и неразрывности типа Сен-Венана в консервативной или неконсервативной форме для описания динамики жидкости в совокупности с уравнением неразрывности Экснера для твёрдой фазы (наносов). Для записи величины расхода наносов, входящего в уравнение Экснера, существует очень большое количество эмпирических и полуэмпирических зависимостей, что зачастую затрудняет их выбор для решения общей задачи. При этом результаты моделирования при использовании различных зависимостей могут быть не только не совпадающими, но и противоречащими друг другу. В связи с этим имеет смысл проводить численные эксперименты, используя различные соотношения для определения расхода наносов, и останавливать свой выбор на тех из них, с помощью которых могут быть получены результаты, не противоречащие здравому смыслу, по крайней мере, для очевидных вариантов решения. Для русел с преобладанием крупного (галечного или гравийного материала) обычно используют уравнение Экснера без учёта взвешенных наносов. В руслах, сложенных более мелким по гранулометрическому составу материалом, необходимо учитывать расход взвешенных наносов, для определения которого используется либо уравнение переноса примеси, либо этот расход рассчитывается интегрированием по

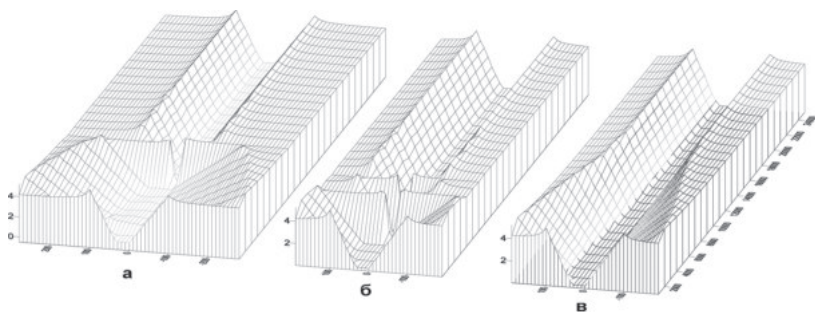


Рис. 4. Рельефы русла через 20 мин попуска $\kappa_{\text{поп}}=3$ в потоке со льдом (а), $\kappa_{\text{поп}}=2$ в потоке со льдом (б), $\kappa_{\text{поп}}=2$ в открытом потоке (в)

глубине произведения скорости потока и концентрации примеси на данном горизонте от дна, полученные эмпирическими или полумпирическими методами. Как тот, так и другой подход требует знания вертикального распределения скорости и концентрации взвешенных наносов, то есть решения двухмерной задачи.

При моделировании наводнений и русловых деформаций, вызванных волновым воздействием и формированием ледовых заторов в нижних бьефах гидротехнических сооружений, основное внимание было уделено определению значимости факторов, влияющих на развитие изучаемых явлений. Разработанная двухмерная модель позволила выявить определяющие параметры задачи, способные привести к наиболее неблагоприятным последствиям при зимних наводнениях. Наиболее значимыми факторами, вызывающими максимальные площади затопления, оказались параметры волны возмущения и форма поперечного сечения русла. На условия возникновения заторов в значительной степени влияют толщина льда и размеры приплотинной полыньи.

Численные эксперименты показали, что изменение пористости грунта мало влияет на ширину разлива при наводнении, но от них значительно зависят вертикальные деформации русла. Объёмы размывов при увеличении пористости увеличиваются в степенной зависимости. Расчёты по двухмерной модели показали соответствие результатам, полученным по одномерным расчётам, о значительных деформациях в приплотинных створах при прохождении волны попуска и о возникновении значительных размывов под кромкой ледяного покрова и деформаций в месте возникновения затора.

Русловые деформации на реках криолитозоны

В рамках работ по изучению откликов криолитозоны на климатические и антропогенные воздействия были проведены исследования влияния речного потока на деформации береговых склонов, сложенных многолетнемёрзлыми породами и берегов с включениями пластов льда при повышении температуры воды в потоке. Метод исследования – лабораторное и математическое моделирование. Был разработан комплекс математических моделей для расчётов характеристик водных потоков и русловых деформаций в реках, протекающих в условиях криолитозоны.

В этот комплекс вошли модели:

- для расчётов русловых деформаций, развивающихся под действием таяния берегового склона и установившегося потока воды [10, 13];
- для расчётов русловых деформаций, развивающихся под воздействием волн различного происхождения и таяния ледяных пластин, вмороженных в береговой склон (гетерогенная модель) [12, 28, 29];
- для расчётов русловых деформаций, развивающихся при одновременном воздействии таяния грунта береговых склонов и нестационарного водного потока (гомогенная модель) [11].

В основу этих моделей и их верификации положены результаты лабораторных экспериментов, проведённых в гидравлическом лотке РУДН. В каждой фазе распределение температуры описывается уравнением теплопроводности. Условие Стефана (закон перемещения границы фазового перехода) – определяется из уравнения теплового баланса. В какой степени размыв осаждаемого грунта влияет на деформации можно оценить, рассчитав величину размыва отметок дна и твёрдых границ в образовавшихся полостях из уравнения сохранения массы переносимых наносов (уравнения деформаций). Разработанные модели описывают процесс латеральных русловых деформаций и в частности так называемый *niching* процесс (образование ниш вытаивания), что позволяет дать ответ на вопросы, давно поставленные в этой области, например, какую роль играет наличие мерзлого грунта на интенсивность размыва. Модельные эксперименты позволяют варьировать все многочисленные пара-

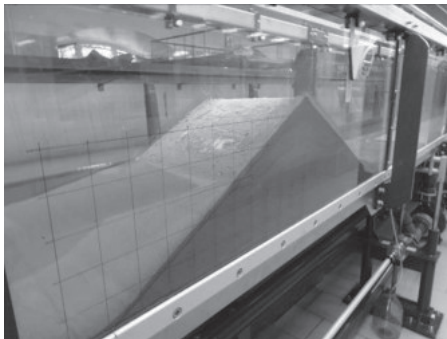


Рис. 5. Общий вид лабораторной установки

метры процесса и ответить на вопрос, какие из них являются наиболее значимыми, и к какому результату может привести любая из этих вариаций при разных условиях. На основе данных численных и лабораторных экспериментов были сделаны прогностические выводы о пространственных и временных масштабах береговых разрушений, вызванных наводнениями, для рек криолитозоны и выявлены наиболее значимые факторы, их вызывающие.

В рамках исследований волновых воздействий на берега, сложенные мёрзлыми породами, продолжают работы по моделированию нормальных волновых воздействий на сооружения откосного типа на лабораторной модели в открытом гидравлическом лотке Российского университета дружбы народов. Для экспериментов с замороженным грунтом верхняя часть модели выдерживалась в морозильной камере в течении 24 часов при температуре -18°C , предварительно грунт увлажнялся, после чего замороженная часть устанавливалась на нижнюю, заранее отсыпанную в лотке, часть модели. Для экспериментов с грунтами, имеющими положительные температуры, модель формировалась увлажненным грунтом на всю высоту непосредственно в самом лотке. На рис. 5 представлен вид рабочей установки для проведения экспериментов.

По данным экспериментов установлены зависимости объёма деформации модели и общего фильтрационного режима от волновых параметров [25]. Проведённые серии экспериментов на лабораторной модели показали, что размыв тела моделируемой преграды, сложенной грунтом с отрицательной температурой, при возникновении волновых процессов происходит интенсивнее, чем при прочих равных условиях преграды, сложенной песком с положительной температурой. Объём деформации мёрзлой модели в среднем на 27% превышает объём деформации модели, сложенной грунтом с положительной температурой. Серии экспериментов показали, что моделирование волновых процессов и возникающих в результате этих воздействий деформаций, достаточно с большой долей достоверности описывает естественные процессы переформирования берегового склона. Результаты проведённых исследований позволяют разработать физико-математическую модель трансформации береговых склонов под воздействием волновых процессов. Полученные результаты, могут быть использованы для прогноза

возможных береговых разрушений на реках криолитозоны, а также при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений, промышленных и жилых объектов в береговых зонах, подверженных термоабразии.

Исследования распространения примеси в водотоках

Примесь в потоках подо льдом

Задача о распространении примесей подо льдом занимает одно из первых мест в ряду исследований экологических последствий аварийных ситуаций в северных регионах. Их оценка невозможна без разработки соответствующих физико-математических моделей. Особенности течения рек в северных регионах предполагают, что такие модели должны учитывать не только реальную морфометрию русла, но также наличие ледяного покрова на протяжении значительной части года и приливной составляющей движения воды. Для полного описания картины распространения примеси в реке необходимы подробные измерения, но они очень дороги и трудоёмки, и не всегда позволяют сделать достоверный прогноз изменения этой картины с течением времени. Прогностические задачи на современном уровне могут быть решены только при использовании математического моделирования процесса. Ещё одно важное преимущество моделирования – это возможность решения так называемой обратной задачи, которая включает определение характера и объёма аварийного сброса по известным из измерений данным о количестве примеси в любой точке исследуемого участка реки или водохранилища. Это особенно важно для доказательства факта аварийного сброса в случае спорных ситуаций при выяснении причин загрязнения.

Были разработаны две модели распространения примеси в подлёдном приливном потоке: двухмерная плановая ($x-y$) модель для расчёта продольно-поперечного переноса и двухмерная ($x-z$) модель с учётом продольно-вертикального переноса [7]. Такое разделение обусловлено прежде всего тем, что временные масштабы процесса вертикального перемешивания значительно меньше, чем продольно-поперечного для большинства рассматриваемых течений, когда вполне правомерно допущение о полном вертикальном перемешивании. Однако при решении ряда задач необходимо знать динамику

ку распространения примеси по вертикали. Учёт влияния ледяного покрова в $(x-y)$ модели достигался введением коэффициента, характеризующего наличие дополнительного сопротивления на поверхности льда, и соотношения для осреднённой по вертикали скорости подлёдного потока, которое отличается от соотношения для открытого потока. Аналитические оценки используемых уравнений показывают, что при переходе к ледоставному режиму отношение поперечного переноса примеси к продольному может увеличиваться и служить причиной расширения струи загрязняющих веществ. Для исследования распространения примеси в подлёдном потоке и тестирования модели был выбран устьевой участок р. Северная Двина в районе Новодвинского ЦБК недалеко от г. Архангельска. Анализ данных натуральных наблюдений и результатов численных экспериментов позволил получить ряд важных теоретических выводов об особенностях переноса пассивной примеси в подлёдном потоке, а также дать оценку реальных аварийных сбросов [1, 7].

Наличие ледяного покрова на поверхности водоёма препятствует поступлению кислорода в толщу воды и тем самым способствует возникновению заморов. В относительно неглубоких водоёмах влияние поверхностных гидрофизических процессов (воздействие ветра, сопротивление при обтекании донного рельефа, ледяного покрова) может распространяться на всю толщу потока и приводить к значительному переформированию его динамической структуры. Поэтому при решении диффузионной задачи в $(x-z)$ модели [7] было учтено изменение коэффициента вертикального турбулентного обмена по глубине. Распределения всех химических компонентов модели рассчитывались с помощью двухмерных уравнений диффузии примеси с источниками. Модель была применена для Азовского моря, так как явление заморов носит здесь естественный характер и наблюдается довольно часто. Процесс образования и развития замора прослеживался по изменению концентраций гидрхимических параметров и главным образом по появлению сероводорода у дна. Было выполнено два численных эксперимента. В первом из них моделировалась гидрофизическая ситуация открытой воды, когда значения скорости на поверхности были максимальными и уменьшались ко дну, а величины коэффициента вертикального турбулентного обмена значительны. При этом замор-

ных явлений не возникало. Во втором эксперименте при прочих равных условиях была рассчитана вертикальная турбулентная структура течения, соответствующая подлёдному потоку. При этом максимальные величины скорости были в центре потока, распределение коэффициента вертикального турбулентного обмена было двухмодальным, а величины этого коэффициента были более низкими, чем в первом случае. При этом замор возникал. Данные этих расчётов показывают, что образование заморов подо льдом связано не только с затруднением поступления кислорода в приповерхностный слой воды через лёд, но и с изменением интенсивности вертикального обмена химическими элементами собственно в толще воды, связанным с перестройкой вертикальной турбулентной структуры потоков подо льдом.

Распространение примеси в условиях заторных наводнений

Проблема прогнозирования и смягчения последствий катастрофических ситуаций, вызванных ледовыми явлениями, обострилась в последнее время в связи со значительным увеличением ущерба, наносимого такими катастрофами. Это связано со строительством новых и неоптимальной эксплуатацией старых гидротехнических сооружений и промышленных предприятий, расположенных вблизи водотоков, подверженных наводнениям и потенциально опасных как источники загрязнений. Критический подъём уровня водотоков приводит к затоплению обширных территорий, прилегающих к водным объектам. Под угрозой затопления оказываются не только населённые пункты, но и объекты промышленного значения, что предполагает возможность загрязнения водной среды различными опасными для жизни и здоровья людей веществами, что может привести к возникновению катастрофических ситуаций экологического характера.

При развитии катастрофических ситуаций практически невозможно проводить натурные измерения, лабораторное же моделирование помимо обычных для открытых потоков трудностей встречает ещё дополнительную проблему моделирования разрушаемого ледового покрова. Поэтому методы прогноза чрезвычайных экологических ситуаций, вызванных ледовыми явлениями, основанные на математическом моделировании, представляются наиболее при-

оритетными. При проведении численных экспериментов появляется возможность просчитать большое количество вариантов развития ситуации с различными сочетаниями параметров задачи, приводящими к образованию заторов и наиболее неблагоприятному сценарию распространения и накопления загрязняющих веществ на затапливаемых территориях.

Модель распространения загрязняющих веществ [8] во время образования ледового затора представляет собой объединение моделей заторообразования и распространения примеси в подлёдном потоке [7]. Задача о распространении примеси в условиях волнового воздействия и возникновения затора зависит не только от параметров водного объекта, волны, положения и интенсивности источника загрязнения и сочетаний этих параметров, но также и от времени и места возникновения затора, его продолжительности. В лаборатории была разработана численная модель распространения загрязняющих веществ от источника, попавшего в зону затопления, вызванного прохождением волны попуска и образованием ледовых заторов, основанная на решении двумерных уравнений движения жидкости и уравнения переноса вещества с привлечением условий образования заторов [8]. В результате расчётов по различным сценариям можно проследить динамику распространения наводнений, вызванных действием волны попуска и образования заторов, изменение полей скорости и концентраций при развитии наводнений. В результате численных расчётов можно составить прогнозы о масштабах предполагаемой чрезвычайной экологической ситуации и дать практические рекомендации по смягчению её последствий. Предложена интегральная характеристика для оценки степени загрязнения в условиях наводнений [8], которая позволяет определить наиболее неблагоприятные факторы и параметры, влияющие на экологическую обстановку на рассматриваемом водном объекте.

Особенности распространения примеси в деформируемых руслах рек криолитозоны

В последние годы большой интерес был проявлен к проблеме выноса реками органических соединений, поскольку речной сток является одним из основных источников поступления растворённых и взвешенных веществ в моря Северного Ледовитого океана. В отечественной и зарубежной литературе широко обсуждается влияние

водных объектов на процессы глобального переноса углерода между различными природными средами и отмечаемое в последнее время увеличение количества органики в Северном Ледовитом океане, причиной которого может быть таяние многолетней мерзлоты в Сибири и рост выноса органических веществ реками. Кроме того общей проблемой для арктического региона является загрязнение окружающей среды стойкими органическими соединениями и другими веществами, которые годами накапливались на этих территориях, и в частности на берегах рек, так как традиционно именно здесь располагаются населённые пункты и объекты промышленного назначения. При потеплении климата и деградации мерзлоты возрастает опасность разрушения берегов и поступления токсичных веществ из мест захоронения промышленных, бытовых, химических и радиоактивных отходов в речные воды и дальнейшего их распространения. Тем не менее, до сих пор не была отслежена очевидная связь разрушения берегов под действием термоэрозии с транспортом взвешенного и растворённого вещества, освобождаемого при разрушении.

Построение математических моделей должно стать главным инструментом не только для прогноза русловых процессов в условиях криолитозоны, но и для углублённого исследования многочисленных взаимосвязей, которые необходимо учитывать при этом. В лаборатории разработаны математические модели, объединяющие процессы переноса примеси, русловые деформации и различные виды таяния берегового склона [12] в условиях нестационарности водного потока. Модели могут быть использованы для прогнозирования распространения и накопления загрязнений в реках криолитозоны, берега которых подвергаются термоэрозии. Для валидации моделей проведены лабораторные эксперименты по распространению примеси в гидравлическом лотке с полностью замороженным склоном (гомогенная модель) и с ледяными включениями (гетерогенная модель). Получены зависимости начала таяния берегового склона от его начальной температуры при разных температурах водного потока, подтверждённые данными лабораторного эксперимента. В результате проведения лабораторных и численных экспериментов были получены новые, практически важные выводы об особенностях распространения примесей в деформируемых и неде-

формируемых руслах. Показано влияние формы поперечного сечения деформируемого русла на распространение примеси. Выдвинуто предположение, что существует такая форма сечения, при которой его деформации приводят к более интенсивному переносу примеси, чем в недеформируемом потоке. Подробно исследовано влияние расположения источника загрязнения в потоке на распространение примеси. Проведена оценка вклада различных частей потока в перенос примеси. Исследование воздействия термической и механической эрозии, вызванной таянием ледяных пластов, включённых в береговой откос, на распространение примеси, позволило сделать вывод о том, что в результате формирования таликов, заполняемых потоком, переносящим примесь, условия равномерности потока нарушаются, приводя к нестационарности распространения примеси. При этом увеличение объёма исследуемого участка за счёт появления полостей в береговом откосе приводит к увеличению концентрации примеси.

Заключение

В настоящее время в лаборатории активно развиваются все традиционные основные направления, и особенно исследования, связанные с криолитозоной. Особое внимание уделяется изучению экологических аспектов: катастрофических наводнений, вызванных ледовыми затруднениями, взаимодействию морских и пресных вод в устьевых областях северных рек, распространению загрязнений в руслах, подверженных термической и механической деформации. Новым направлением является изучение деформационных процессов на повороте русел, берега которых сложены многолетнемерзлыми породами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреховских В.Ф., Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Мордасов М.А. Исследование процессов распространения загрязняющих веществ в приливных устьях северных рек // *Вод. ресурсы*. Т. 2, №5, 1997. С 532–536
2. Воды суши: проблемы и решения. Отв. ред. акад. РАН М.Г. Хублярян. М.: ИВП РАН. 1994. 560 с.
3. Грицук И.И., Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К. Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород // *Лёд и снег*. №3 (119), 2012. С. 73–78

4. Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарёв Н.К., Синиченко Е.К. Лабораторное исследование снеготаяния как составляющей сезонного процесса деформаций русла // Вестник РУДН (Инженерные исследования). №3, 2013. С. 83–91
5. Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарёв Н.К., Синиченко Е.К. Экспериментальное исследование влияния солнечной радиации на интенсивность снеготаяния // Вестник РУДН (Инженерные исследования) №1, 2015. С. 83–90
6. Гришин Н.Н. Механические свойства ледяного покрова рек. М.: ИВП АН, 1979.
7. Дебольская Е.И. Динамика водных покровов под ледяным покровом, М.: Изд. ИВП РАН и МГУП, 2003. 279 с.
8. Дебольская Е.И. Математические модели ледовых заторов и их последствий. Монография под ред. В.К. Дебольского. М.: Изд. РУДН, 2014. 107 с.
9. Дебольская Е.И. Численное моделирование турбулентной структуры подледных потоков // Водные ресурсы. Т. 27, №2, 2000. С. 167–174
10. Дебольская Е.И. Математическая модель русловых деформаций рек криолитозоны // Водные ресурсы. Т. 41, №5, 2014. С. 496–506
11. Дебольская Е.И. Моделирование русловых деформаций, вызванных волновым и термическим воздействием, на реках криолитозоны. Труды VIII Международной конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» М., 2014. С. 61–69
12. Дебольская Е.И., Грицук И.И., Дебольский В.К., Ионов Д.Н., Масликова О.Я. Влияние береговых деформаций на распространение примесей в реках криолитозоны (лабораторное и математическое моделирование) // Водные ресурсы. Т. 44, № 5, 2017.
13. Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Грицук И.И., Масликова О.Я., Ионов Д.Н. Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды // Лёд и Снег. . №1 (121), 2013. С. 104–111.
14. Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я. Математическое моделирование деформаций дна в покрытых льдом нестационарных потоках // Водные ресурсы. Т. 33, №1, 2006. С.29–38.
15. Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ермаков А.В. Влияние ледяного покрова на деформации дна в нижних бьефах // Водные ресурсы. Т. 35, №6, 2008. С. 663–670.
16. Дебольская Е.И., Дербенев М.В., Масликова О.Я. Численное моделирование ледовых заторов // Водные ресурсы. №5, 2004, С. 533–539.
17. Дебольская Е.И., Долгополова Е.Н., Решетков А.Б. Экспериментальные исследования структуры подледного течения // Водные ресурсы. . Т. 26, №1, 1999. С. 96–103
18. Дебольская Е.И., Масликова О.Я., Котляков А.В., Артемьев С.А. Одномерная и двумерная модели динамики русла в нижних бьефах ГТС в условиях формирования ледовых заторов //Материалы гляциологических исследований. №105, М., 2008. С. 188–195

19. Дебольская Е.И., Масликова О.Я., Исаенков А.Ю. Математическое моделирование деформаций русла в нижних бьефах ГЭС, расположенных в криолитозоне, при катастрофических наводнениях в условиях ледовых затруднений // *Природообустройство*. №3, 2010. С. 51–58.

20. Дебольский В. К., Дебольская Е.И., Котляков А.В., Дербенев М.В., Замятина Э.В. Современная пространственно-временная изменчивость ледовых явлений в устьевых областях рек российской Западной Арктики // *Известия РАН. Серия географическая*. №2, 2008. С. 36–42

21. Дебольский В.К., Дебольская Е.И., Масликова О.Я. Двухмерная модель русловых деформаций в условиях формирования ледовых затопов // *Гидротехническое строительство*. №5, 2009. С. 41–45

22. Долгополова Е.Н. Условия образования бора и его влияние на перенос осолонённых вод в устьях рек // *Водные ресурсы*. Т.40, №1, 2013. С. 1–17.

23. Долгополова Е.Н. Закономерности движения вод и наносов в устье реки эстуарно-дельтового типа на примере р. Енисей // *Водные ресурсы*. Т. 42, №2, 2015. С. 198–207

24. Долгополова Е.Н., Котляков А.В. Многолетнемерзлые породы в устьевых областях арктических рек России // *Лёд и Снег*. Т. 113, №1, 2011. С. 81–92)

25. Ионов Д.Н., Грицук И.И. Исследование деформаций берегов, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, на лабораторной модели // *Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей*. 2014. С. 403–411.

26. Котляков А.В., Грицук И.И., Масликова О.Я., Пономарев Н.К., Экспериментальное исследование влияния льдистости грунтов, слагающих русло рек, на динамику берегового склона // *Лёд и снег*. №2 (114), 2011. С.92–98

27. Масликова О.Я., Экспериментальное исследование интенсивности снеготаяния на лабораторной модели // *Природообустройство*. №1, 2016. С. 28–33

28. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 216 с.

29. Debolskaya E. A mathematical model of reservoir and river bank deformations in permafrost regions under simultaneous effect of the waves and warming. *Engineering Geology for Society and Territory*. Springer International Publishing, Switzerland Vol. 3. 2014. P. 98–103.

30. Dolgopolova E. Vertical transfer in ice-covered channel flow // *Proc. 19-th IAHR Inter. Symp. On Ice*. V. I, Vancouver, Canada. 2008. P. 531–542

31. Dolgopolova E. Scales of mixing processes in rivers // *XXX IAHR Congress, Water Engineering and Research in a Learning Society: Modern Developments and Traditional Concepts*. Thessaloniki. Greece. 2003. P. 317–323.

32. Elder J.W. The dispersion of Marked Fluid in Turbulent Dhear flow. *J. Fluid Mech.*, Vol. 5, No.4, 1959.

33. Pariset E., Hauser R., Cagnon A. Formation of Ice Cover and Ice Dams in River. *IHD ASCF V. 92*, №6, 1966. P. 66–79

Нелинейная волновая диффузия в геосредах: пампинг-эффект

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00209а)

В.Н. Зырянов

Впервые задача математической физики гидросферы о нелинейной волновой диффузии для процессов, описываемых нелинейными параболическими уравнениями типа уравнения теплопроводности, была рассмотрена J.R. Philip [30]. Он показал, что в чисто периодических диффузионных процессах из-за их нелинейности возникает остаточный эффект – эффект накопления субстанции внутри области. В качестве приложения он рассмотрел периодическую задачу о безнапорной фильтрации грунтовых вод для уравнения Бесснесска. Независимо от этой работы на аналогичный остаточный эффект, но уже в динамике приливных волн на мелководье, вышли авторы работы [12] в результате экспериментальных исследований эволюции приливных волн в Белом море.

Полная теория этого явления для общего случая квазилинейных параболических уравнений была развита в работе [13], в которой для этого явления был предложен термин «пампинг-эффект», т.е. эффект накачки. Последующие исследования диффузионных процессов в различных геосредах показали, что пампинг-эффект имеет всеобъемлющий характер и проявляется во многих средах. На сегодняшний день имеется целый ряд интересных результатов по пампинг-эффекту. Данная статья посвящена обзору проявления этого эффекта в различных геосредах. Довольно полный обзор типов параболических уравнений, к которым применима теория пампинг-эффекта, приведён в статье [35].

Развитая в [13] теория пампинг-эффекта была использована в исследованиях нелинейных эффектов трансформации приливных волн на мелководье [7, 9], в построении теории соленостного клина в приливных устьях рек [6], в предсказании эффекта антипотепления глубинных вод Мирового океана [8], в описании интрузии морских вод в береговые подземные горизонты в приливных морях [10, 14, 21], в задаче Стефана о росте льда [11].

Спектр физических процессов в природе, описываемых нелинейными параболическими уравнениями типа уравнения теплопроводности с коэффициентом теплопроводности, являющимся

функцией искомой характеристики среды, довольно широк. Хотя этот класс уравнений называется уравнением теплопроводности, он встречается при описании совершенно различных процессов. Общая форма этих уравнений имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = b \operatorname{div}[F(T) \operatorname{grad} T], \quad (\text{В. 1})$$

где b – некоторая константа, а функция среды $F(T)$ имеет различные зависимости для разного класса задач. Наиболее часто $F(T)$ описывается степенной функцией $F(T) = T^n$. Например, при $n=1$ уравнение (В. 1) описывает динамику безнапорной фильтрации в пористых средах [20], T в этом случае является уровнем грунтовых вод; при $n \geq 1$ – фильтрацию политропного газа в пористых средах [5, 16, 29], давление P и плотность ρ которого связаны уравнением $P = \text{const } \rho^n$ (n – показатель политропы), в этом случае T является плотностью газа ρ ; при $n=3$ – динамику тонкого слоя жидкости, стекающего под действием силы тяжести [23], растекание магматической лавы по горизонтальной плоскости, эволюцию длинных гравитационных волн типа приливных на мелководье [7, 12, 27]; при $n=6$ – радиационное рассеяние волн Маршака [5, 26].

Много статей посвящено изучению автомодельных и инвариантно-групповых решений уравнения (В. 1). В частности, Г.И. Баренблатт [2] получил автомодельные решения первого и второго рода (неполная автомодельность по терминологии Баренблатта) для (В. 1). Однако автомодельные решения относятся к задачам Коши с начальными условиями или к краевым задачам, но со специфическими граничными условиями. В данной статье будет описан эффект, возникающий в периодической краевой задаче для параболического уравнения нелинейной теплопроводности (В. 1).

1. Теория пампинг-эффекта

Будем рассматривать одномерный аналог уравнения (В. 1). Именно для одномерного уравнения удалось найти один важный инвариант. Рассмотрим периодическую задачу для одномерного уравнения (В. 1) на полупрямой $x > 0$ с граничными условиями

$$T|_{x=0} = f(t), \quad T|_{x \rightarrow 0} < C < \infty, \quad (1.1)$$

где $f(t)$ – периодическая функция с периодом τ или с частотой $\omega = 2\pi/\tau$. Обычно $f(t)$ имеет вид $f(t) = T_0 + T_1 \cos \omega t$. Очевидно, что в отсутс-

твие колебаний на границе ($T_1=0$) функция $T=T_0$ будет решением уравнения (В. 1).

Введём оператор осреднения по периоду

$$\langle T \rangle = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} T dt. \quad (1.2)$$

Пусть $\Psi(T)$ – первообразная функция от $F(T)$, т.е.

$$\Psi(T) = \int F(T) dT. \quad (1.3)$$

Будем предполагать, что $\Psi(T)$ – однозначная функция. Обозначим обратную к Ψ функцию как Ψ^{-1} . Тогда справедлива основная теорема [13]:

периодическое решение уравнения (В. 1) с граничными условиями (1.1) стремится при $x \rightarrow +\infty$ к константе $T(\infty)$:

$$T(\infty) = \Psi^{-1}[\sigma \Psi(f(t)) \tau], \quad (1.4)$$

вообще говоря, не совпадающей с T_0 . Величина $\sigma \Psi(T) \tau$ является инвариантом, т.е. имеет одно и то же значение на всей полуоси $x > 0$.

Из теоремы следует, что чисто гармоническое колебание характеристики среды T на границе области приводит к увеличению или уменьшению ее значения внутри области относительно ее среднего значения на границе. Следовательно, возникает эффект либо накачки, либо, наоборот, откачки субстанции на бесконечности гармоническими колебаниями на границе. Этот эффект в [13] предложено назвать пампинг-эффектом. Разность $T^{(\pm)} = T(\infty) - T_0$ даёт количественное значение пампинг-эффекта. Знак \pm в верхнем индексе означает, что эта величина может быть как положительной, так и отрицательной. В случае линейного уравнения (В. 1) при $F(T) = \text{const}$ очевидно, что $T(\infty) = T_0$ и никакого пампинг-эффекта не возникнет.

Доказательство теоремы опирается на предположение, что решение уравнения (В. 1) с граничными условиями (1.1) может содержать только кратные щ частоты. Справедливость этого предположения может быть обоснована аналитически для случая малых значений отношения $\varepsilon = T_1/T_0$ в выражении для $f(t)$, т.е. при $\varepsilon \ll 1$. Предположим, что $\Psi(T)$ – аналитическая функция, и разложим её в ряд Тейлора в окрестности T_0 . Тогда уравнение (В. 1) можно записать в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(F(T_0) + \frac{dF(T_0)}{dT} \varepsilon T + \frac{1}{2} \frac{d^2F(T_0)}{dT^2} \varepsilon^2 T^2 + \dots \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right]. \quad (1.5)$$

Будем искать решение уравнения (1.5) в виде асимптотического ряда по ϵ :

$$T=T^{(0)}+\epsilon T^{(1)}+\epsilon^2 T^{(2)}+\dots \quad (1.6)$$

Подставляя (1.6) в (1.5) и группируя члены нулевого, первого и т.д. порядков по ϵ , получим систему редуцированных линейных неоднородных уравнений теплопроводности, которые будут содержать только кратные ω частоты.

Легко найти значение инварианта $\langle \Psi \rangle$ на бесконечности, так как колебания там затухают. Но на практике такая задача чаще встречается для ограниченных областей $0 \leq x \leq L$ и процедура нахождения значения инварианта, описанная выше, не проходит для отрезка. В общем случае решение уравнения (В. 1) на отрезке может быть найдено только численно. Однако, если отношение $\epsilon=T_1/T_0$ в выражении для $f(t)$ – малая величина, т.е. $\epsilon \ll 1$, то можно найти аналитическое выражение для пампинг-эффекта. С этой целью рассмотрим уравнение (1.5) и ограничимся в $F(T)$ только членами не выше первого порядка по ϵ :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\alpha + \beta \epsilon T + O(\epsilon)) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1.7)$$

где $\alpha=F(T_0)$, $\beta=dF(T_0)/dT$. На правом конце отрезка поставим условие второго рода:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = 0, \quad (1.8)$$

которое физически означает отсутствие потока субстанции через границу. Будем искать решение уравнения (1.7) с граничными условиями (1.1), (1.8) в виде асимптотического ряда (1.6) с граничными условиями для членов ряда:

$$T^{(0)} \Big|_{x=0} = A \cos \omega t, \quad \left. \frac{\partial T^{(0)}}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad T^{(1)} \Big|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} \right|_{x=L} = 0. \quad (1.9)$$

Решение для первого приближения $T^{(0)}$ ищем в виде

$$T^{(0)} = \text{Re} [Q(x) e^{i\omega t}] = \frac{Q(x) e^{i\omega t} + Q^*(x) e^{-i\omega t}}{2}, \quad (1.10)$$

где Re – действительная часть выражения в скобках, а звездочка – комплексно сопряженная функция. Подставляя (1.10) в первое приближение уравнения (1.7), получим выражение для $Q(x)$:

$$Q(x) = T_1 \frac{\text{ch}[\lambda(L-x)]}{\text{ch}(\lambda L)}, \quad (1.11)$$

где $\lambda = (1+i)\sqrt{\omega/(2\alpha)}$. Подставляя (1.11) в (1.10) и затем во второе приближение уравнения (1.7) относительно ϵ , получим решение для $T^{(1)}$, содержащее периодическую часть и независящее от времени слагаемое. Стационарное слагаемое и описывает пампинг-эффект

$$T^{(\pm)}(x) = -\frac{\beta}{4\alpha} [Q(x)Q^*(x) - Q(0)Q^*(0)]. \quad (1.12)$$

Выражение (1.12) дает количественное значение величины пампинг-эффекта в любой точке x отрезка. На конце отрезка $x=L$ величина пампинг-эффекта будет

$$T^{(\pm)}(L) = -\frac{\beta T_1^2}{4\alpha} \left[\frac{1}{\text{ch}(\lambda L)\text{ch}(\lambda^* L)} - 1 \right]. \quad (1.13)$$

При $L \rightarrow \infty$ получим

$$T^{(\pm)}(\infty) = -\frac{\beta T_1^2}{4\alpha}. \quad (1.14)$$

Из (1.4) видно, что знак пампинг-эффекта зависит от знака β/α .

Из соотношения (1.12) можно оценить расстояние $L_{(+)}$, на котором среднее значение искомой функции выходит на асимптотическое решение (1.13),

$$L_{(+)} = \frac{1}{\lambda + \lambda^*} = [2 \text{Re}(\lambda)]^{-1} = \left(\frac{\alpha}{2\omega} \right)^{1/2} = \left[\frac{F(T_0)}{2\omega} \right]^{1/2}. \quad (1.15)$$

Итак, если функция среды $F(T)$ в (В. 1) есть линейная функция $F(T) = \alpha + \beta T$, то будем иметь выражение для пампинг-эффекта на бесконечности [9]:

$$T^{(\pm)} = -b \pm \sqrt{b^2 + T_1^2/2}, \text{ где } b = \alpha/\beta + T_0. \quad (1.16)$$

Если $b < 0$, необходимо брать минус в (1.16), если $b > 0$, то знак плюс. При $T_1/b \ll 1$ и $\alpha/\beta \gg T_0$ соотношение (1.16) упрощается и переходит в (1.14).

На рис. 1 приведены результаты численного решения уравнения (1) с безразмерной функцией $F(T)$ в виде

$$F(T) = ca/(b+rT) \quad (1.17)$$

где $c=10$, $a=2,25$, $b=1$, $r=0,596$. Задание функции $F(T)$ в виде (30) связано с приложением пампинг-эффекта к океанам и озёрам, которое будет изложено ниже. На границе при $x=0$ ставится периодическое условие $T=1+q(t)\sin t$, на конце отрезка $x=5$ задаётся отсутствие потока через границу. Функция $q(t)$ задаётся следующим образом: она равняется 0,2 при $0 < t < 200$ (первый режим), затем линейно меняется

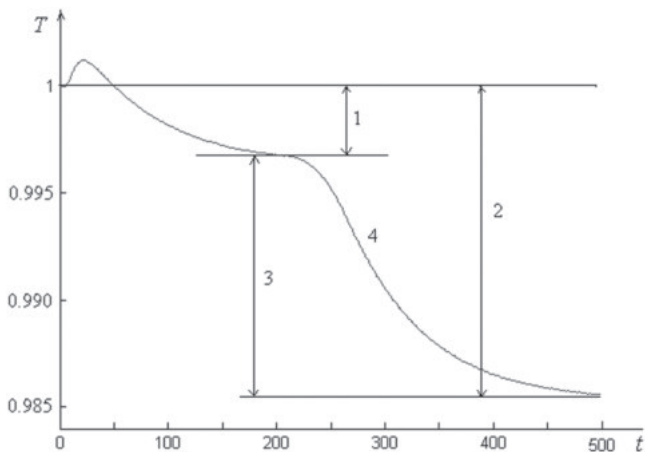


Рис. 1. Поведение температуры T во времени в придонной области модельного бассейна после увеличения амплитуды колебания температуры на поверхности водоёма в два раза (модельный численный расчёт, все величины безразмерные). Объяснения обозначений 1–4 даны в тексте

от 0,2 до 0,4 при $200 < t < 250$ и далее остаётся равной 0,4 при $250 < t < 500$ (второй режим). Таким поведением функции $q(t)$ моделировалась ситуация в океане, когда амплитуда колебания температуры поверхности океана или озера вначале некоторое время держится на одном значении, а затем линейно переходит на другое значение, в данном случае – в два раза большее предыдущего. Как видно из результатов численного счёта, температура в глубинных слоях сначала выходит на один асимптотический уровень (кривая 4 на рис. 1), соответствующий первому режиму (уровень 1), а затем, когда амплитуда колебания температуры на поверхности океана $x=0$ увеличивается вдвое, переходит на второй асимптотический уровень, соответствующий второму режиму (уровень 2). Потеря тепла будет определяться разностью между уровнями 1 и 2 (интервал 3). В данном случае пампинг-эффект отрицательный.

Нетрудно сделать общий вывод из физики процесса – пампинг-эффект будет положительным, если $F(T)$ в (1) – возрастающая функция, и отрицательным, если она убывающая, как, например, (30). Действительно, выражение в скобках в уравнении (1) есть поток тепла. Для возрастающей функции $F(T)$ на фазе верхней части синусоиды хода температуры поток тепла внутрь области будет больше, нежели на фазе нижней части синусоиды хода температуры. В

результате возникает остаточный поток тепла, который будет ненулевым и направленным внутрь области. В этом случае возникает положительный пампинг-эффект. Аналогичные физические рассуждения для случая убывающей функции $F(T)$ приводят к отрицательному пампинг-эффекту.

2. Пампинг-эффект в динамике приливных волн на мелководье

В прибрежных зонах морей, в вершинах заливов и эстуариев глубины, как правило, уменьшаются и становятся сравнимыми с толщиной слоя Стокса $h_{st} = \sqrt{K_z \tau}$ (K_z – кинематический коэффициент вертикального турбулентного обмена, τ – характерный временной масштаб движений (период волны)). При глубинах меньше толщины слоя Стокса трение становится доминирующим. Кроме того, начинает сильно проявляться нелинейность – амплитуда приливного колебания уровня становится сравнимой с глубиной, в результате линейные приближения становятся неприменимыми. Колебания свободной поверхности описываются нелинейным параболическим уравнением [7, 12] для возвышения уровня ζ :

$$\zeta_t = \frac{g}{3K_z} \nabla[(h+\zeta)^3 \nabla \zeta], \quad (2.1)$$

где $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ – оператор Гамильтона, g – ускорение свободного падения, $h(x, y)$ – невозмущенная глубина моря. Одномерный аналог уравнения (2.1) будет иметь вид одномерного уравнения (В. 1) с $F(\zeta) = \frac{g}{3K_z} (h+\zeta)^3$. Движение рассматривается в вертикальной плоскости, перпендикулярной к берегу. Колебания уровня на внешней глубоководной границе мелководной зоны задается приходящей приливной волной $\zeta = \zeta_0 \sin \omega t$, $\omega = 2\pi/\tau$. При $h = \text{const}$ получим следующее выражение для инварианта

$$(h + \zeta^{(+)})^4 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau (h + \zeta_0 \sin \omega t)^4 dt. \quad (2.2)$$

Вычисляя интеграл в (2.2), получим значение пампинг-эффекта для приливного уровня на бесконечности

$$\zeta^{(+)} = h \left\{ \left[1 + 3 \left(\frac{\zeta_0}{h} \right)^2 + \frac{3}{8} \left(\frac{\zeta_0}{h} \right)^4 \right]^{1/4} - 1 \right\}. \quad (2.3)$$

Из (2.3) видно, что величина пампинг-эффекта для приливных волн будет положительной, т.е. средний уровень увеличивается на

мелководье под действием прилива. В случае малости отношения амплитуды приходящей волны прилива ζ_0 к глубине h (т.е. при $\varepsilon = \zeta_0/h \ll 1$), выражение (2.3) упрощается

$$\zeta^{(+)} \approx \frac{3}{4} \frac{\zeta_0^2}{h}. \quad (2.4)$$

Как видно из (2.4), средний уровень приливного колебания повышается при приближении к берегу. В устьях рек, впадающих в приливные моря, пампинг-эффект приводит к перемещению зоны подпора вглубь реки.

Опишем этот пампинг-эффект применительно к воронкообразным заливам (эстуариям). Приведём уравнение (2.1) к безразмерному виду. Для этой цели введём безразмерные параметры со штрихом:

$$\zeta = \tilde{\zeta}_0 \zeta', \quad t = \tau_0 t', \quad h = H_0 h', \quad (x, y) = L(x', y'). \quad (2.5)$$

Подставляя (2.5) в (2.1) и опуская далее штрихи, получим уравнение (2.1) в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \bar{A} (\nabla \cdot (h + \varepsilon \zeta)^3 \nabla \zeta), \quad (2.6)$$

где $\bar{A} = \frac{g T_0 H_0^3}{3 A L^2}$, $\varepsilon = \zeta_0 / H_0$ – отношения амплитуд прилива к глубине жидкости. Будем считать пока ε малой величиной. Перейдём к полярным координатам с полюсом в вершине залива. Считаем, что по угловой координате φ уровень меняется мало, тогда зависимостью ζ от φ можно пренебречь. В результате будем иметь нелинейное уравнение

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \bar{A} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r (h + \varepsilon \zeta)^3 \frac{\partial \zeta}{\partial r} \right). \quad (2.7)$$

Будем искать решения (2.7) в виде асимптотического ряда по малому параметру ε

$$\zeta = \zeta_0 + \varepsilon \zeta_1 + \dots \quad (2.8)$$

Подставляя (2.8) в (2.7), получим уравнения для первого и второго приближений по ε :

$$\frac{\partial \zeta_0}{\partial t} = \bar{A} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r H^3 \frac{\partial \zeta_0}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial \zeta_1}{\partial t} = \frac{\bar{A}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r H^3 \frac{\partial \zeta_1}{\partial r} + \frac{3}{2} r H^2 \frac{\partial \zeta_0^2}{\partial r} \right). \quad (2.9)$$

Граничные условия:

на внешней границе мелководной зоны ($r=R$) залива задаётся входящая приливная волна с амплитудой q , а в вершине ($r=0$) твёрдая стенка:

$$\zeta|_{r=R} = qe^{i\omega t}, \quad \left. \frac{\partial \zeta}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (2.10)$$

Соответственно, для ζ_0 и ζ_1 будем иметь граничные условия:

$$\zeta_0|_{r=R} = \frac{q}{\zeta_0} e^{i\omega t}, \quad \left. \frac{\partial \zeta_0}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad \zeta_1|_{r=R} = 0, \quad \left. \frac{\partial \zeta_1}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (2.11)$$

Ищем волновые решения системы (2.9). Для первого приближения ζ_0 получим решение первого уравнения системы (2.9)

$$\zeta_0 = \frac{q}{\zeta_0} \left[\frac{J_0(kr)}{J_0(kR)} e^{i\omega t + conj} \right], \quad (2.12)$$

где $k = \sqrt{\frac{i\omega}{Ah^3}}$, J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $conj$ – комплексно сопряжённое выражение первого слагаемого.

Для нахождения следующего приближения ζ_1 необходимо выражение (2.12) подставить во второе уравнение (2.9). Заметим, что при возведении выражения (2.12) в квадрат получим два волновых члена и стационарный член в виде удвоенного произведения слагаемых в (2.12):

$$2 \frac{J_0(kr)J_0(k^*r)}{J_0(kR)J_0(k^*R)}. \quad (2.13)$$

Волновые слагаемые решения уравнения (2.9) для ζ при осреднении по периоду волны дадут ноль, а остаточный подъём уровня, пампинг-эффект, будет определяться выражением (2.13) в правой части уравнения (2.9): В результате интегрирования получим

$$\zeta_1 = \frac{3q^2}{\zeta_0^2 h} \left[\frac{J_0(kr)J_0(k^*r)}{J_0(kR)J_0(k^*R)} - 1 \right]. \quad (2.14)$$

Или в размерной форме:

$$\zeta^{(+)} = \varepsilon \zeta_0 \zeta_1 = \frac{3q^2}{h} \left[\frac{J_0(\tilde{k}r)J_0(\tilde{k}^*r)}{J_0(\tilde{k}R)J_0(\tilde{k}^*R)} - 1 \right], \quad (2.15)$$

где $\tilde{k} = \sqrt{\frac{3i\omega A}{gh^3}}$. В вершине залива при $r=0$ величина пампинг-эффекта в обозначениях формулы (2.4) будет равна

$$\zeta^{(+)} = \frac{3\zeta_0^2}{h} \left[\frac{J_0(\tilde{k}r)J_0(\tilde{k}^*r)}{J_0(\tilde{k}R)J_0(\tilde{k}^*R)} - 1 \right], \quad (2.16)$$

где ζ_0 – амплитуда прилива на входе в бухту.

3. Пампинг-эффект в процессах интрузии морских вод в устья приливных рек

Солёная морская вода проникает в устья рек в придонном слое в виде клина солёных вод. Динамика солёностного клина в двухслойной модели в канале постоянной глубины H_0 меньшей толщины слоя Стокса, описывается системой двух нелинейных параболических уравнений для свободной поверхности $z=\zeta(t, x)$ и толщины нижнего слоя $z=\eta(t, x)$ [6]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= \gamma \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (H_0 - \zeta)^3 \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \delta \frac{\partial \eta}{\partial x} (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) \right\}, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \gamma \delta \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \eta^3 \left(4 - \frac{3\eta}{H_0} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} - \delta^{-1} \frac{\partial \zeta}{\partial x} (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) \right\}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

В (3.1) $\gamma=g/(3A_z)$, $\delta=\Delta\rho/\rho_1$, A_z – кинематический коэффициент вертикального турбулентного обмена, g – ускорение свободного падения, $\Delta\rho$ – разность плотностей морской и речной воды, ρ_1 – плотность речной воды.

На входе в устье задаются периодические колебания уровня и толщины нижнего слоя морской воды

$$x=0: \zeta=\zeta_0 \cos \omega t, \eta=\eta_0 \cos \omega t + D,$$

где D – средняя толщина нижнего слоя на входе в канал.

Оценим величину пампинг-эффекта для свободной поверхности и поверхности раздела слоев ζ_{∞}^{\pm} и η_{∞}^{\pm} . Для этого запишем систему (3.1) в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= \gamma \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[-\frac{1}{4} (H_0 - \zeta)^4 - \delta \left(H_0 \eta^3 - \frac{\eta^4}{2} \right) \right], \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \gamma \delta \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\left(\eta^4 - \frac{3}{5H_0} \eta^5 \right) - \frac{1}{\delta} \int_0^x (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) \frac{\partial \zeta}{\partial x} dx \right]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Применяя оператор осреднения (1.2) к (3.2) и интегрируя дважды по x , получим систему:

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \langle (H_0 - \zeta)^4 \rangle + \delta \langle H_0 \eta^3 - \eta^4/2 \rangle &= C_1 x + C_2, \\ \left\langle \eta^4 - \frac{3}{5H_0} \eta^5 \right\rangle - \frac{1}{\delta} \left\langle \int_0^x (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) \frac{\partial \zeta}{\partial x} dx \right\rangle &= C_3 x + C_4. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Из условия ограниченности уровня ζ и толщины нижнего слоя η при $x \rightarrow +\infty$ следует, что $C_1=C_3=0$ в (3.3). Таким образом, выражения в левой части системы (3.3) являются инвариантами относительно

сдвигов по оси X вдоль канала. Вычисляя эти инварианты на входе в канал и в бесконечно удалённой точке, где колебания затухают, получим систему уравнений для определения ζ_∞^+ и η_∞^\pm :

$$\begin{aligned} & (H_0 - \zeta_\infty^+)^4 + \delta \left(H_0 - \frac{1}{2} \eta_\infty^\pm \right) (\eta_\infty^\pm)^3 = \\ & = \frac{1}{4} \left\langle (H_0 - \zeta(0, t))^4 \right\rangle + \delta \left\langle H_0 \eta^3(0, t) - \frac{\eta^4(0, t)}{2} \right\rangle, \\ & (\eta_\infty^\pm)^4 - \frac{3}{5H_0} (\eta_\infty^\pm)^5 = \left\langle \eta^4(0, t) - \frac{3}{5H_0} \eta^5(0, t) \right\rangle + \\ & + \frac{1}{\delta} \left\langle \int_0^{+\infty} \frac{\partial \zeta}{\partial x} (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) dx \right\rangle \end{aligned} \quad (3.4)$$

Из первого уравнения системы (3.4) видно, что с точностью до $O(\delta)$ мы будем иметь для ζ_∞^+ соотношение (2.4):

$$\zeta_\infty^+ = \frac{3\zeta_0^2}{4H_0} (1 + O(\delta)), \quad (3.5)$$

т.е. наличие двухслойности даёт в выражении (3.5) поправку порядка $O(\delta)$. Труднее обстоит дело с оценкой η_∞^\pm из-за наличия в правой части (3.4) нелокального члена

$$J = \left\langle \int_0^{+\infty} \frac{\partial \zeta}{\partial x} (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) dx \right\rangle. \quad (3.6)$$

Однако тот факт, что в двухслойной жидкости накачка уровня ζ_∞^+ практически такая же, как и в однородной, позволяет вычислить выражение (3.6), воспользовавшись для нахождения $\partial \zeta / \partial x$ результатами однородной модели. В однородном случае ($\delta=0$) решение первого уравнения (3.2) в случае малых величин $\alpha = \zeta_0/H$ можно представить в виде асимптотического ряда по δ :

$$\zeta = \zeta_0 \sum_{k=0}^{+\infty} \alpha^k \zeta_k(x, t). \quad (3.7)$$

Подставляя (3.7) в первое уравнение (3.2) при $\delta=0$ и ограничиваясь только двумя членами асимптотического ряда (3.7), получим с точностью до $O(\delta^2)$:

$$\begin{aligned} \zeta = \zeta_0 \operatorname{Re} \{ & i \exp[-(1+i)kx + i\omega t] - \frac{3\alpha}{4} [(1+i) - \exp(-2kx + 2\pi i) - \\ & - 2\exp[-2(1+i)kx + 2i\omega t] - 2\exp[-(1+i)k\sqrt{2x} + 2i\omega t]] \} + O(\alpha^2), \end{aligned} \quad (3.8)$$

где $k = \sqrt{\frac{6\omega A_z}{gH_0^3}}$ – волновое число.

Дифференцируя (3.8) по x и подставляя в (3.6), получим сумму интегралов Лапласа вида

$$I(t) = \int_0^{\infty} e^{-vkx} f(x, t) dx. \quad (3.9)$$

Для полусуточной приливной волны M_2 при глубинах, меньших толщины слоя Стокса, $H \leq h_{St} = \sqrt{A_z T_0}$ величина $kL \gg 1$, где L – характерный пространственный масштаб движений. Тогда для вычисления интеграла (3.9) можно воспользоваться его асимптотикой [18] при $k \rightarrow +\infty$:

$$I(t) \sim \sum_{s=0}^{+\infty} (vk)^{-s-1} \left. \frac{\partial^s f}{\partial x^s} \right|_{x=0}. \quad (3.10)$$

Ограничившись первым членом асимптотического ряда (3.10), получим для (3.6)

$$J \approx V_0 \left\langle 3H_0 \eta^2(0, t) - 2\eta^3(0, t) \left(-\frac{3\alpha}{4} + \sin \omega t \right) \right\rangle. \quad (3.11)$$

Подставляя в (3.11) граничное условие для z и выделяя пампинг-эффект нижнего слоя $\Delta \eta_{\infty}^{\pm} = \eta_{\infty}^{\pm} - D$, получим из второго уравнения (3.4) приближённую формулу

$$\Delta \eta_{\infty}^{\pm} \approx \frac{3\beta^2(H_0 - D)D}{4H_0 - 3D} + \delta^{-1} \frac{3\alpha H_0^2 [(4\beta - 3\alpha)H_0 + (2\alpha - 4\beta)D]}{4D(4H_0 - 3D)}, \quad (3.12)$$

где $\beta = \eta_0/D$, $\alpha = \zeta_0/H_0$.

Из (3.12) видно, что на величину пампинг-эффекта в нижнем слое влияет знак выражения:

$$G = (-3\alpha + 4\beta)H_0 + (2\alpha - 4\beta)D.$$

При $G > 0$ будем иметь положительную накачку ($\Delta \eta_{\infty}^+ > 0$), при $G < 0$ и $\delta \beta^2 D^2 (H_0 - D) + \alpha H_0^2 G < 0$ – отрицательную накачку ($\Delta \eta_{\infty}^- < 0$). При $\Delta \eta_{\infty}^+ \geq H_0 - D$ будем иметь вообще выклинивание верхнего слоя, т.е. нарушение двухслойности в горизонтальном канале. При отсутствии поверхностной волны ($\alpha = 0$), для накачки нижнего слоя внутренней волной амплитуды η_0 из (3.12) имеем выражение:

$$\Delta \eta_{\infty}^+ = \frac{3\eta_0^2 (H_0 - D)}{D(4H_0 - 3D)}. \quad (3.13)$$

Итак, в зависимости от соотношения амплитуд поверхностной ζ_0 и внутренней η_0 волн и отношения толщины верхнего слоя H_0-D и нижнего D накачка нижнего слоя может быть положительная или отрицательная вплоть до возможного выклинивания верхнего либо нижнего слоя. На наклонной плоскости указанные эффекты будут способствовать либо увеличению длины солёностного клина, либо её уменьшению. Оценки величины пампинг-эффекта нижнего слоя, к примеру, для условий устья р. Онеги: $H_0=8$ м, $D=6$ м, $\alpha=0,2$, $\beta=0,3$, $\delta=1,5 \times 10^{-2}$ дают $\Delta\eta_{\infty}^+ \approx 23$ см.

Величина накачки нижнего слоя в отсутствие поверхностной волны, как следует из (3.13), достигает своего максимума при $D=2/3H_0$, равного

$$\max(\Delta\eta_{\infty}^+) = \frac{3\eta_0^2}{4H_0}, \quad (3.14)$$

т.е. получается идентичная (2.4) формула; только теперь в числителе стоит амплитуда внутренней волны на входе в устье реки.

Итак, в устьях рек, впадающих в приливные моря, пампинг-эффект для свободной поверхности $z=\tau(t, x)$ приводит к перемещению зоны подпора вод выше по реке, а для поверхности раздела слоёв $z=3(t, x)$ приводит к увеличению длины солёностного клина и, как следствие, к более глубокому проникновению солёных морских вод в устья приливных рек. Численные расчёты показывают, что глубина проникновения солёных вод в устья приливных рек из-за пампинг-эффекта может быть существенно больше, чем в устья непривливых рек. Это отличие может составлять километры.

4. Пампинг-эффект в процессах теплообмена с глубинными слоями озёр, морей и океанов

Интересно посмотреть, какую роль играет пампинг-эффект в передаче тепла в глубинные слои морей, океанов и озёр. Как было показано в разделе 1 численным расчётом, тепло может не только закачиваться внутрь океана, но и наоборот, откачиваться из глубин в зависимости от того, увеличивается или уменьшается амплитуда колебания поверхностной температуры. Этот поток тепла из глубинных слоёв океана из-за пампинг-эффекта будет повышать температуру поверхностных вод и вносить дополнительный вклад в общее потепление климата.

В настоящее время основной причиной потепления климата считается парниковый эффект, который связывают в основном с увеличением содержания двуокиси углерода в атмосфере. Но период потепления климата, помимо положительного тренда повышения глобальной температуры, характеризуется увеличением амплитуды годовых и многолетних колебаний температуры приземных слоёв атмосферы и поверхности Мирового океана. Солнечная радиация, безусловно, является основным внешним источником формирования климата Земли. Но сама вариация солнечной радиации мала и составляет 0,1–0,6% от её среднего значения. Это означает, что процессы внутреннего перераспределения потоков тепла в системе поверхность Земли – атмосфера играют главную роль в формировании изменений климата. Парниковый эффект является одним из таких внутренних причин климатических изменений. Пампинг-эффект также относится к внутренним процессам перераспределения тепла на Земле, закачивая в глубинные слои или откачивая из них тепло при изменении амплитуды колебаний температуры поверхности океана (ТПО). Как видно из результатов численного решения на рис. 1, при увеличении амплитуды колебания ТПО теплосодержание глубинных вод будет уменьшаться. В [4, 28] приводятся данные, подтверждающие охлаждение глубинных вод в Атлантике.

Дж. Рейд [31] нашел значимую корреляцию между потеплением климата и колебаниями ТПО. В [19] также подтверждается этот вывод по результатам анализа изменений ТПО в Атлантике за последние 50 лет. На рис. 2 приведён график колебаний ТПО в экваториальной зоне Атлантики, начиная с 1959 г. [19]. График базируется на инструментальных наблюдениях и спутниковых данных. Видно, что амплитуда многолетних колебаний ТПО начиная с 1960 г. увеличивается. К 2000 г. амплитуда колебания ТПО увеличилась на 1,5°C. Таким образом, амплитуда многолетних колебаний ТПО в Атлантике за период 1950–2000 гг. увеличилась примерно в 1,5 раза.

Средним уравнение теплопроводности для Мирового океана по широте и долготе. Тогда распределение температуры воды по вертикали будет описываться одномерным уравнением нелинейной теплопроводности. Примем граничные условия в виде (1.1), где $f(t) = T_0 + T_1 \cos \omega t$ Однако сразу получить уравнение (В. 1) не удаётся,

так как известно, что функция среды $F(T)$, или, точнее, коэффициент теплопроводности для океана, зависит от градиента температуры, а не от самой температуры, поэтому надо попытаться найти зависимость градиента температуры от самой температуры, с тем чтобы прийти к уравнению (В. 1). Функция теплопроводности для океана определяется процессами турбулентного перемешивания. Она на много порядков больше коэффициента молекулярной теплопроводности. Коэффициент вертикального турбулентного обмена в океане пропорционален коэффициенту обмена импульсом по вертикали K_z . Ниже поверхностного слоя Экмана для K_z в океанологии используется следующая параметризация [25, 32] с использованием частоты Вэйсяля–Брента :

$$N(z) = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$$

$$K_z(z) = \mu N^{-\gamma}, \quad (4.1)$$

где $\mu = \delta / N_0^{1-\gamma}$; $\delta \approx (1.2) \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}^2$; $0,5 \leq \gamma \leq 1,5$; и N_0 – характерное значение частоты Вэйсяля–Брента. Как отмечено в [25], $\gamma = 1$ – наиболее подходящее значение. В глубоководных слоях океана стратификация вод слабая и, следовательно, $N(z)$ может оказаться очень малой величиной. В результате соотношение (4.1) будет давать сильно завышенные значения K_z в глубоководных слоях. Чтобы избежать этого, в [33] предложена модификация соотношения (4.1) введением ограничения $K_z \leq K_z^{\max}$, и соотношение (4.1) более корректно можно записать в виде:

$$K_z(z) = \min(\mu N^{-\gamma}, K_z^{\max}). \quad (4.2)$$

Будем предполагать, что $K_z \leq K_z^{\max}$, следовательно, соотношение (4.1) справедливо для всей толщи океана. Но чтобы непосредственно применить изложенную теорию пампинг-эффекта, необходимо выразить K_z в зависимости не от градиента температуры, а непосредственно от самой температуры, т.е. в виде $K_z = K(T)$. Для этого воспользуемся результатами работы [17], в которой показано, что фоновое распределение частоты Вэйсяля–Брента в открытом океане в геострофической области хорошо аппроксимируется гиперболической зависимостью

$$N(z) = h_E N_E / (z + h_E), \quad (4.3)$$

где h_E – толщина верхнего слоя трения Экмана, N_E – значение частоты Вэйсяля–Брента на верхней границе геострофической области.

Аппроксимация (4.3) получена в результате статистической обработки большого количества данных непосредственных наблюдений за распределением плотности воды в различных точках Мирового океана. Заметим, что среднегодовое распределение частоты Вьяйсяля–Брента в Мировом океане изучалось в [24], но параметризации для $N(z)$ не было предложено.

Учитывая (4.3), можно написать

$$N^2(z) = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} = \left(\frac{h_E N_E}{z + h_E} \right)^2. \quad (4.4)$$

В (4.4) использована стандартная аппроксимация частоты Вьяйсяля – Брента с заменой в знаменателе плотности ρ на среднее значение ρ_0 . Интегрируя (4.4) от дна $z=H$ до уровня z , получим

$$\frac{h_E^2 N_E^2}{z + h_E} = \frac{g}{\rho_0} (\rho(H) - \rho(z)) + \frac{h_E^2 N_E^2}{H + h_E}. \quad (4.5)$$

Подставляя $h_E N_E / (z + h_E)$, из (4.5) в (4.3) и затем в (4.1), получим

$$K(z) = \frac{\mu H_E^\gamma N_E^\gamma}{\left[\frac{g}{\rho_0} (-\rho(z) + \rho(H)) + \frac{h_E^2 N_E^2}{H + h_E} \right]^\gamma}. \quad (4.6)$$

Считая поле солёности «замороженным» в океане, используем простейшее уравнение состояния морской воды в приближении Буссинеска: $\rho = \rho_H (1 - \alpha_T (T - T_H))$, где α_T – коэффициент термического расширения воды, $\rho_H = \rho(H)$ и $T_H = T(H)$. Тогда будем иметь окончательное выражение для функции температуропроводности в океане:

$$F(T) = CK_z(T) = \frac{A}{(B + RT)^\gamma}, \quad (4.7)$$

где $A = S \mu h_E^\gamma N_E^\gamma$; $B = \frac{h_E^2 N_E^2}{H + h_E} - \frac{g \rho_H \alpha_T T_H}{\rho_0}$; $R = \frac{g \rho_H \alpha_T}{\rho_0}$, S – число Шмидта (отношение характерного значения кинематического коэффициента турбулентной теплопроводности к кинематическому коэффициенту турбулентного обмена импульсом).

Рассмотрим вначале случай термически однородного океана $T(z) = T_0$. Нижнюю границу поверхностного слоя Экмана (т.е. верхнюю границу геострофической области) отождествим с поверхностью океана. Соотношение (32) позволяет избежать сингулярности в

(4.7), поэтому будем иметь $B+RT>0$. Первообразной функцией для функции (4.7) при $\gamma \neq 1$ будет функция $A/(1-\gamma)R(B+RT)^{\gamma-1}$, а при $\gamma=1$ – функция $(A/R)\ln(B+RT)$. При $\gamma=1$ получим для инварианта выражение:

$$\langle \ln(B+RT^{(\infty)}) \rangle = \langle \ln[B+R(T_0+T_1 \cos \omega t)] \rangle. \quad (4.8)$$

Вычисляя интеграл в правой части (4.8), будем иметь

$$\ln(B+RT^{(\infty)}) = \ln \left\{ \frac{B+RT_0 + \sqrt{(B+RT_0)^2 - (RT_1)^2}}{2} \right\}. \quad (4.9)$$

При условии малости отношения $RT_1/(B+RT_0)$ соотношение (4.9) упрощается:

$$T^{(\infty)} - T_0 = T^{(-)} \approx - \frac{RT_1^2}{4(B+RT_0)}. \quad (4.10)$$

Аналогично находим выражение для пампинг-эффекта при $\gamma=1/2$. В этом случае первообразной функцией для (4.7) будет функция $\frac{2A}{R}\sqrt{B+RT}$. Для пампинг-эффекта получим выражение

$$T^{(\mp)} = \frac{11}{R} \left[\frac{6}{4\pi^2} (B+RT_0+RT_1) E^2(k) - (B+RT_0) \right], \quad (4.11)$$

где

$$k^2 = 2a/(1+a) < 1, \quad a = RT_1/(B+RT_0). \quad (4.12)$$

В (4.11) $E(k)$ – полный эллиптический интеграл второго рода. Разлагая $E(k)$ до вторых степеней и оставляя только члены до четвертого порядка по k получим

$$T^{(-)} \approx - \frac{RT_1^2}{8(B+RT_0+RT_1)}. \quad (4.13)$$

Итак, пампинг-эффект для Мирового океана отрицателен. Это означает, что когда амплитуда колебания поверхностной температуры T_1 в океане увеличивается, температура глубинных слоёв падает, т.е. тепло начинает откачиваться из глубинных слоёв океана. И наоборот, при уменьшении амплитуды колебания поверхностной температуры по сравнению с предыдущим периодом времени глубинные слои будут теплеть, т.е. тепло будет закачиваться вглубь океана.

Приведём количественные оценки на примере Тихого океана. Полагаем, что $h_E \approx 100$ м, $N_E \approx 10^{-2} \text{с}^{-1}$, $H \approx 5$ км, и $\alpha_T = 1,67 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$. Для оценок используем среднее значение придонной температуры Тихого океана $T_H \approx 2,08 \text{°C}$. Тогда вычисления дают $B \approx -3,27 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$ и

$R \approx 1,67 \times 10^{-3} \text{ м}(\text{°C})^{-1} \text{ с}^{-2}$ Средняя температура вод Тихого океана составляет $T_0 \approx 3,66 \text{°C}$ [3], в результате получим $B + RT_0 \approx 2,8 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$.

Из основной теоремы и полученных формул для пампинг-эффекта следует, что величина пампинг-эффекта не зависит от коэффициента A в (4.7). Но от него зависит толщина слоя Стокса, в котором решение выходит на асимптотику. Из (1.15) получим толщину слоя Стокса, в котором наблюдаются колебания температуры и в котором температура выходит на асимптотический уровень пампинг-эффекта $T^{(\infty)}$,

$$L_{(+)} = \left[\frac{A}{2\omega(B + RT_0)^{\gamma}} \right]^{1/2}. \quad (4.14)$$

Принимая число Шмидта, равным единице ($S \approx 1$), получим $A \approx 2 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}^3$. Вычисляя (4.14), получим толщину слоя Стокса около 83 м для колебаний температуры с периодом один год и около 187 м для колебаний температуры с периодом пять лет. Из приведённых оценок видно, что толщина слоя Стокса, где температура выходит на асимптотический уровень, существенно меньше общей глубины океана и поэтому приближение бесконечно глубокого океана для расчёта величины пампинг-эффекта вполне обосновано.

Оценим, насколько температура глубинных слоёв однородного океана может снизиться при увеличении амплитуды многолетних колебаний температуры поверхности океана на $T_1 \approx 0,35 \text{°C}$. Рис. 1 иллюстрирует эту ситуацию. Для $\gamma = 1$ соотношение (4.10) даёт оценку $\Delta T_{\infty}^{(-)} = -1,9 \cdot 10^{-2} \text{ (°C)}$. В случае $\gamma = 1/2$ вычисления по формуле (4.11) приводят к оценке $\Delta T_{\infty}^{(-)} = -9 \cdot 10^{-3} \text{ (°C)}$.

Приведённые выше оценки потерь тепла глубинными слоями океана были сделаны для термически однородного океана. Такое состояние океана соответствует одному из стационарных решений уравнения (В. 1) с коэффициентом температуропроводности в форме (4.7) при нулевом фоновом потоке тепла по вертикали. Однако в реальном океане фоновый поток тепла по вертикали, вообще говоря, не равен нулю. Оценим величину пампинг-эффекта при наличии ненулевого фонового потока тепла. При $\gamma = 1$ в (4.7) уравнения (В. 1) имеет стационарное решение

$$T(z) = \frac{1}{R} [-B + C_1 \exp(C_2 Rz)], \quad (4.15)$$

где

$$C_1 = RT_S + B, C_2 = \frac{1}{RH} \ln \frac{RT_H + B}{RT_S + B}, \quad (4.16)$$

T_S – температура поверхности океана и T_H – придонная температура, H – глубина океана.

Решение (4.15) описывает фоновое стационарное экспоненциальное распределение температуры в океане в геострофической области с поверхностной температурой T_S и придонной температурой T_H . На рис. 2 приведено численное решение одномерного уравнения (В. 1) с функцией теплопроводности (4.7) для $\gamma=1$ при фоновом распределении температуры по глубине (4.15) с $T_S=10^\circ\text{C}$ и $T_H=2,08^\circ\text{C}$. На поверхности океана ставилось граничное условие на температуру в виде $T(t, z)|_{z=0} = 10 + 0,7 \sin \omega t$ с периодом $2\pi/\omega = 1$ год. Функция теплопроводности задавалась в виде (4.7) со значениями $B = -3,27 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$, $R = 1,67 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2 (\text{ }^\circ\text{C})$.

Так как величина пампинг-эффекта не зависит от значения коэффициента A (от него зависит только толщина слоя Стокса), то в расчётах принималось $A = 4 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}^3$. Амплитуда флуктуаций поверхностной температуры, равная $0,7$, задавалась на основании работы [19]. Как видно из рис. 3, после начала счета температура во всех точ-

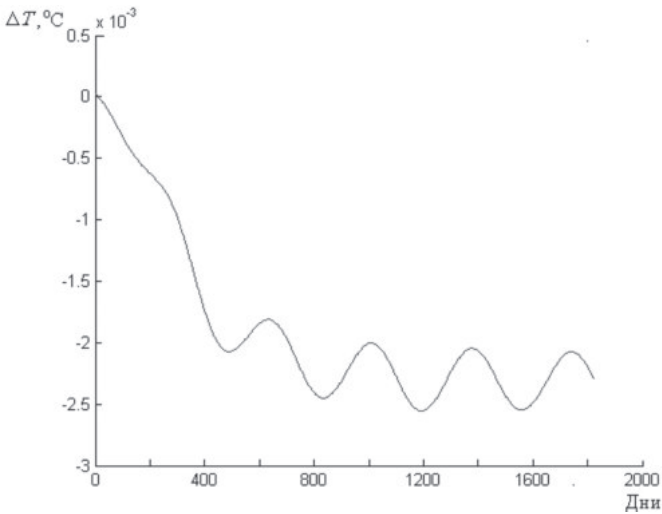


Рис. 2. Падение температуры на глубине 2000 м относительно стационарного решения (4,15) после включения годовых колебаний температуры поверхности океана с амплитудой $0,7^\circ\text{C}$ (численный эксперимент)

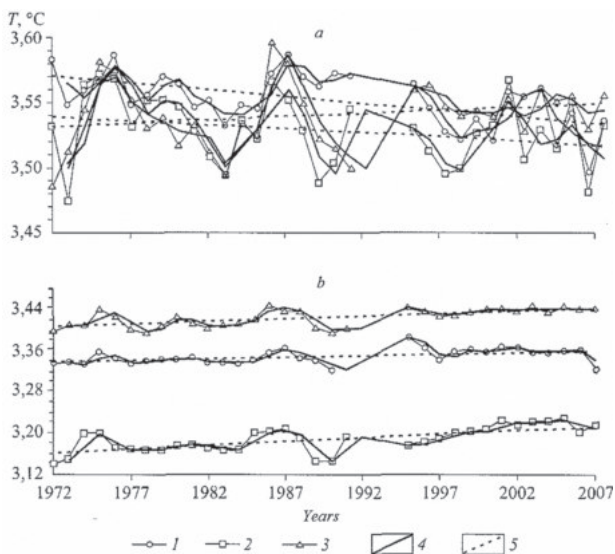


Рис. 3. Осреднённые долгопериодные изменения температуры слоёв воды в Южном, Среднем и Северном Байкале в июне–сентябре 1972–2007 гг. [32]: (а) – поверхностный слой 200–400 м, (б) – придонный слой (200 м от дна) (1) Южный Байкал, (2) Средний Байкал, (3) Северный Байкал, (4) – скользящее осреднение по 5-ти годам, (5) – тренд

ках водной толщи начинает падать. На глубине 2000 м она снижается на величину $2,5 \times 10^{-3}$ (°C). Дополнительный поток тепла из глубинных слоев океана за счёт пампинг-эффекта может составлять около 0,18–0,25 Вт/м².

Интересный пример проявления нелинейной волновой диффузии тепла наблюдается на Байкале. На рис. 3 представлены долгопериодные колебания температуры, осредненные по поверхностному слою 200–400 м и по 200-метровому придонному слою [32]. Из рисунка видно, что средняя температура в поверхностном слое в летний период 1972–2007 гг. падает, т.е. поверхностные слои озера охлаждаются. В то время как температура придонных слоёв повышается! Очевидно, что это явление никак не может быть объяснено конвекцией, иначе бы нижние слои тоже охлаждались.

По-видимому, это явление связано с проявлением пампинг-эффекта. Действительно, если обратить внимание на амплитуды колебаний температуры поверхностного слоя, то можно увидеть, что амплитуды долгопериодных колебаний температуры в слое 200–400 м за период

1972–2007 гг. уменьшились почти вдвое. В соответствии с теорией пампинг-эффекта уменьшение амплитуды колебания температуры на границе области приводит к закачке тепла в глубинные слои и, следовательно, к их потеплению. Вероятно, этим и можно объяснить столь странное поведение температуры придонных слоёв озера Байкал.

5. Пампинг-эффект в динамике грунтовых вод: теория, эксперимент

5.1. Теория

Пампинг-эффект проявляется в динамике грунтовых вод, в частности, при фильтрации морских вод в береговые водоносные слои в приливных морях, что приводит к увеличению дальности проникновения морских вод в водоносные горизонты и повышению уровня грунтовых вод.

Рассмотрим задачу безнапорной фильтрации грунтовых вод. В приближении Буссинеска будем иметь одномерное нелинейное параболическое уравнение относительно уровня грунтовых вод $H(z, t)$:

$$m \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{\eta^n} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta^n k H \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) + \varepsilon(H, \eta, t), \quad (5.1.1)$$

где m – пористость (недостаток насыщения), t – время, k – коэффициент фильтрации, $\varepsilon(H, \eta, t)$ – источники и стоки (перетекание в нижние пласты, инфильтрация или испарение с поверхности грунтовых вод). При $n=1$ уравнение (5.1.1) соответствует осесимметричному случаю в полярных координатах ($\eta=r$), при $n=0$ – одномерному случаю в декартовой системе координат ($\eta=x$), когда фильтрация рассматривается в вертикальной плоскости.

Будем рассматривать динамику грунтовых вод в декартовой системе координат, тогда $H(x, t)$ будет описываться уравнением (5.1.1) с $n=0$. При отсутствии перетекания в нижние пласты, а также инфильтрации и испарения $\varepsilon(H, \eta, t)=0$. Если уровень воды в водоёме на входе в водоносный пласт имеет периодическое изменение во времени, тогда $H(x, t)$ описывается уравнением (В. 1) на полупрямой $x>0$ с периодическим граничным условием при $x=0$:

$$H(0, t) = H_0 + H_1 \cos(\omega t), \quad (5.1.2)$$

где H_1 – амплитуда колебания уровня грунтовых вод при $x=0$, ω – частота колебаний, H_0 – среднее значение уровня грунтовых вод.

Найдём величину пампинг-эффекта. Для этого вычислим инвариант $\langle F(H(x, t)) \rangle$, значения которого должны быть одинаковыми на границе $x=0$ и на бесконечности $x=+\infty$, где колебания затухают. Первообразной для функции $K(H)=H$ будет функция $F(H)=1/2H^2$. На бесконечности имеем

$$\langle F(H^{(\infty)}) \rangle = 1/2(H_0 + H^{(\pm)})^2. \quad (5.1.3)$$

Величина $H^{(\pm)}$ будет значением пампинг-эффекта. Значение инварианта при $x=0$ с учётом (5.1.2) равно

$$\langle F(H(0, t)) \rangle = \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi/\omega} (H_0 + H_1 \cos \omega t)^2 dt = \frac{1}{2} \left(H_0^2 + \frac{H_1^2}{2} \right). \quad (5.1.4)$$

Приравнивая (5.1.3) и (5.1.4), получим

$$H^{(\pm)} = \left(H_0^2 + \frac{H_1^2}{2} \right)^{1/2} - H_0. \quad (5.1.5)$$

Из (5.1.5) видно, что величина пампинг-эффекта в задаче о безнапорной фильтрации всегда положительная. Если амплитуда колебаний H_1 в (5.1.2) мала по сравнению с H_0 , то выражение (5.1.5) можно упростить

$$H^{(\pm)} \approx \frac{H_1^2}{4H_0}. \quad (5.1.6)$$

Итак, периодические колебания уровня грунтовых вод на входе в водоносный пласт около своего среднего положения H_0 приводят за счёт пампинг-эффекта к стационарному повышению уровня грунтовых вод на бесконечности на величину $H^{(\pm)}$. Формула (5.1.6) была получена также в [30].

Если длина водоносного пласта имеет конечную протяжённость L , то, используя решение (1.13), получим величину пампинг-эффекта на конце пласта при условии $H_1 \ll H_0$:

$$H^{(\pm)}(L) \approx -\frac{H_1^2}{4H_0} \left[\frac{1}{\cosh(\lambda L) \cosh(\lambda^* L)} - 1 \right], \text{ где } \lambda = (1+i) \sqrt{\frac{\omega m}{2H_0 k}}. \quad (5.1.7)$$

Для наклонного берега имеем выражение для осреднённого за период прилива профиля вдоль пласта, полученное в работе [21]:

$$\langle H(x) \rangle = \frac{H_1^2}{H_0} \left[\frac{1}{4} (1 - e^{-2kx}) + \frac{\beta}{2} (1 - \sqrt{2} e^{-kx} \sin(x + \frac{\pi}{4})) \right], \quad (5.1.8)$$

где $k = \sqrt{\frac{\omega m}{2H_0 k_f}}$, $\beta = H_0 k \text{ctg}(\alpha)$, α – угол наклона берега.

Из (5.1.8) видно, что величина пампинг-эффекта в глубине пласта в случае наклонного берега будет равна [21]:

$$H^{(+)} = \frac{H_1^2}{H_0} \left[\frac{1}{4} + \frac{\beta}{2} \right], \quad (5.1.9)$$

т.е. наклонный берег даёт дополнительную добавку в пампинг-эффект. Эта добавка к базовому пампинг-эффекту названа в [21] профильным пампинг-эффектом.

5.2. Пампинг-эффект в тонких насыщенных слоях с приточностью

При наличии насыщенного слоя движения грунтовых вод с верхней или нижней приточностью, так же как течения в перфорированных трубах с боковым притоком или оттоком, описываются уравнением Бюргера относительно скорости [20]. И если на боковой границе слоя будут колебания скорости, например из-за прилива, то возникающий пампинг-эффект приведёт к интересному математическому результату – возникновению постоянного потока вглубь слоя от его внешней границы [20]. Здесь нелинейность входит не через диффузию, а через адвекцию. Покажем, что для этого уравнения также имеет место пампинг-эффект. Рассмотрим периодическую задачу для уравнения Бюргера на полупрямой

$$\tau_t + (\tau_x)^2 = \eta \tau_{xx} \quad (5.2.1)$$

с граничными условиями

$$\zeta|_{x=0} = \zeta^{(0)} \sin \omega t, \quad \zeta|_{x \rightarrow \infty} < C < \infty. \quad (5.2.2)$$

Уравнение (5.2.1) написано в безразмерном виде, η – безразмерный коэффициент вязкости. Заменой Хопфа – Коула $\tau = 2\eta \ln(\zeta)$ уравнение (5.2.1) сводится к линейному уравнению теплопроводности относительно новой функции ζ , решение которого с граничными условиями (5.2.2) будет иметь вид

$$\phi(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \exp \left\{ -\xi^2 - \frac{\zeta^{(0)}}{2\nu} \sin \left[\omega \left(t - \frac{x^2}{4\nu\xi} \right) \right] \right\} d\xi. \quad (5.2.3)$$

Чтобы вычислить интеграл (5.2.3), воспользуемся производящей функцией для функций Бесселя первого рода. Тогда можно написать

$$\phi(x, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{2 \exp(in\omega t)}{\sqrt{\pi}} J_n \left(-\frac{\zeta^{(0)}}{2vi} \right) \int_0^{\infty} \exp \left[-x^2 - \frac{in\omega x^2}{4vx^2} \right] d\xi. \quad (5.2.4)$$

Чтобы найти предел функции $\phi(x, t)$ в (5.2.4) при $x \rightarrow +\infty$, воспользуемся леммой Римана–Лебега об интегралах от осциллирующих функций [18]. В результате получим

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \phi(x, t) = \frac{2}{\pi} J_0 \left(-\frac{\zeta^{(0)}}{2vi} \right) \int_0^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi = J_0 \left(-\frac{\zeta^{(0)}}{2vi} \right) = I_0 \left(\frac{\zeta^{(0)}}{2v} \right), \quad (5.2.5)$$

где I_0 – функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента. Возвращаясь к исходной функции $\zeta(x, t)$, получим выражение для пампинг-эффекта для уравнения Бюргерса (5.2.1):

$$\zeta^{(+)} = 2v \ln \left[I_0 \left(\frac{\zeta^{(0)}}{2v} \right) \right]. \quad (5.2.6)$$

Так как $I_0 \geq 1$, то пампинг-эффект для уравнения Бюргерса всегда положителен. При условии малости аргумента функции I_0 выражение (5.2.6) упрощается:

$$\zeta^{(+)} \approx \frac{(\zeta^{(0)})^2}{16v}. \quad (5.2.7)$$

Из (5.2.7) видно, что значение пампинг-эффекта для уравнения Бюргерса зависит обратно пропорционально от вязкости.

5.3. Эксперимент

Большой интерес представляет экспериментальное подтверждение пампинг-эффекта. С этой целью были проведены лабораторные эксперименты для проверки пампинг-эффекта в задачах фильтрации грунтовых вод под действием волн и количественного сравнения с выводами теории (5.1.6) и (5.1.9) [10].

Лабораторная установка состояла из прямоугольной кюветы из плексигласа длиной 60, шириной 12 и высотой 15 см. Схема лабораторной установки приведена на рис. 4. В качестве экспериментального материала, имитирующего грунт, использовались полиэтиленовые гранулы диаметром $\sim 3,7$ мм. Такой размер гранул брался с целью снижения до минимума влияния на процесс капиллярности. Гранулы насыпались в правую часть кюветы высотой 6 см. Передняя граница насыпи удерживалась латунной сеткой. Проводилось два вида экспериментов – с вертикальным береговым откосом и с береговым уклоном 30° . Высота воды составляла $H_0 = 3$ см.

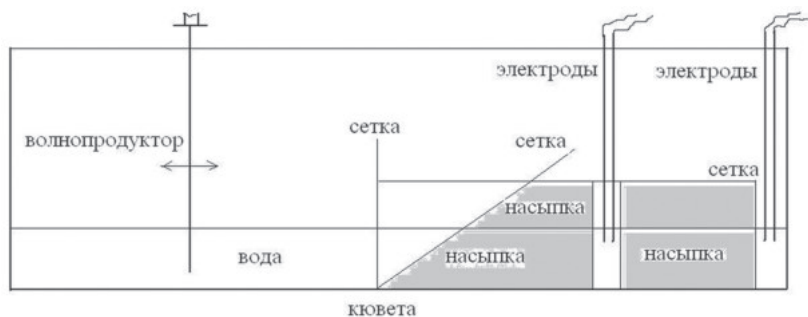


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Пористость материала определялась экспериментально заливкой воды. Взвешивался контрольный объём сухой засыпки, затем по верхнюю границу засыпки наливалась вода, и контрольный объём вновь взвешивался. Затем засыпка высушивалась и опыт повторялся с целью набора статистики. Всего было проведено пять измерений. Зная удельный вес полиэтилена и воды, вычислялись их объёмы, и находилась пористость.

Выборка измерений по определению пористости лабораторного материала

Измерение	1	2	3	4	5
Масса сухого материала M_1 , гр.	38	39	39	37	38
Масса заполненного водой материала M_2 , гр.	55	55	56	57	55
Пористость (m)	0,277	0,261	0,273	0,317	0,277

Как видно из таблицы, среднее значение пористости лабораторного материала составляло 0,28. Оценку коэффициента проницаемости k проводили двумя способами: по теории идеальных грунтов Козени–Кармана [10], откуда получили для коэффициента фильтрации оценку: $k_f \approx 290$ см/с, и обратной задачей, по экспериментальным данным через декремент затухания волны в грунте. По данным эксперимента, амплитуда волны при прохождении через насыпку в кювете длиной в 29 см уменьшается с 5 мм на входе до 0,17 мм в конце кюветы. Зная экспоненциальный закон затухания волны для вертикального берега, вычислили k_f . Было получено $k_f \approx 96$ см/с, т.е. в три раза меньше, нежели по теории идеальных грунтов. Из-за того, что в носике насыпки не удалось выдержать по техническим причинам угол в 30° из-за загиба проволочной арматуры

каркаса сетки, эффективный угол наклона берега в зоне наката волны составил $\sim 45^\circ$. Соответственно, для β было принято в расчётах значение $\beta \approx 0,3$.

Набегающая на берег волна генерировалась в левой половине кюветы лопаточным волнопродуктором (рис. 4). Вертикальная лопатка волнопродуктора осуществляла синусоидальное возвратно-поступательное движение вдоль оси канала с периодом 1,1 с. Такой период движения лопатки задавался с целью возбуждения первой моды сейшевых колебаний в левой части кюветы. Это необходимо было для того, чтобы накат воды на насыпь имел одну чётко выраженную единичную гармонику без наложения волн других периодов.

Регистрация уровня воды в грунте производилась в самом конце кюветы, где был оставлен отгороженный сеткой свободный от насыпного материала промежуток до стенки в 1 см. Кроме того, в середине насыпки на расстоянии 18 см от её передней кромки также была сделана вертикальная круглая полость диаметром 1 см с сеточным ограждением для регистрации уровня в промежуточной точке насыпки. Регистрирующая аппаратура состояла из двух проволочных параллельных электродов, которые нижними концами опускались в воду. На контакты подавалось переменное напряжение через мост, с которого снимался аналоговый сигнал. Чувствительность системы менялась с помощью компенсатора напряжения. Точность измерения составляла 0,01 мм. Аналоговый сигнал (напряжение тока) подавался на микропроцессор Arduino Uno, с которого оцифрованный массив колебания напряжения поступал в компьютер. Связь между изменениями напряжения тока и уровня воды для метрической оцифровки значений устанавливалась с помощью винтового микрометра.

На рис. 5 в качестве примера приведена запись колебания уровня в конце кюветы после прохождения волн через насыпку для вертикального берегового откоса. Из рисунка видно, что после возбуждения волнопродуктором волны средний уровень колебаний в конце кюветы поднимается. Это и есть пампинг-эффект. Аналогичные записи были получены для наклонного берега, в том числе и в средней точке насыпки.

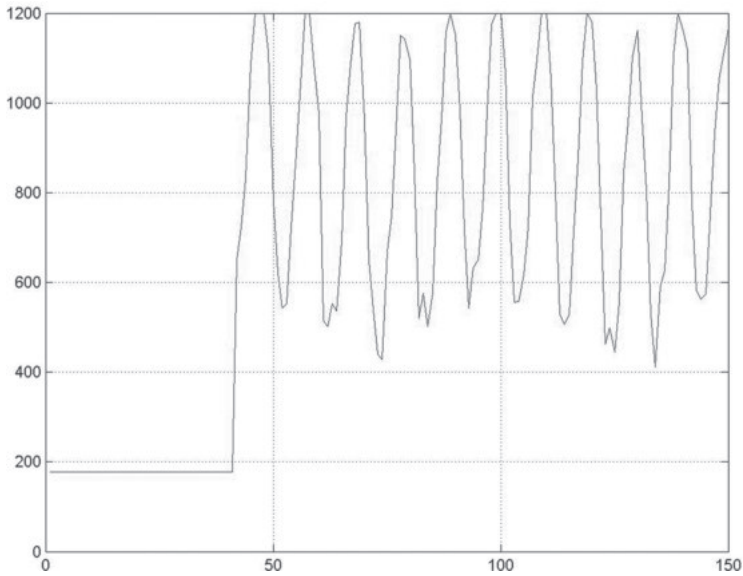


Рис. 5. Запись оцифрованного сигнала колебания уровня воды в эксперименте с отвесным берегом.

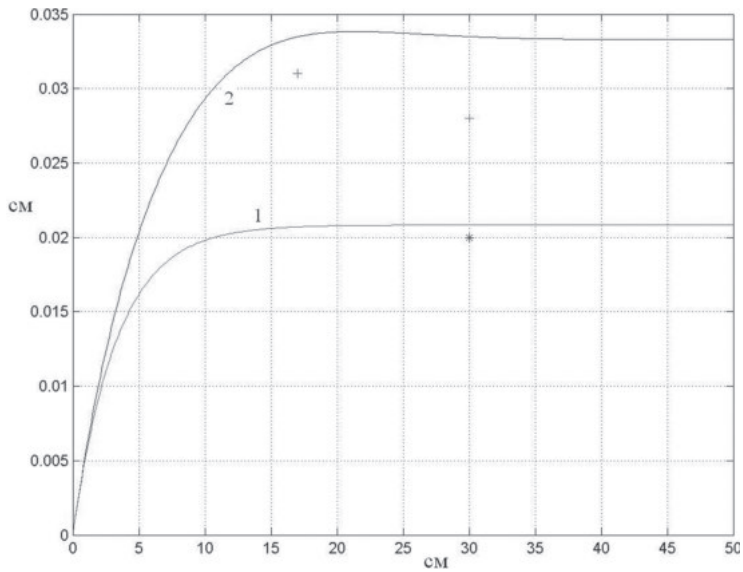


Рис. 6. Распределение среднего уровня по (13) и данные экспериментов: 1 – для отвесного берега (эксперимент – звездочка); 2 – для наклонного берега (эксперимент – крестики).

На рис. 6 приведены графики осреднённого за период уровня воды, построенные по зависимости (5.1.9) для наклонного под углом 45° берега и для отвесного берега ($\beta=0$) по (5.1.6). Звездочками нанесены экспериментальные точки. Как видно из рисунка, эксперимент подтверждает теоретические результаты. Для отвесного берега экспериментальная точка довольно близко лежит от теоретической кривой, для наклонного берега соответствие несколько хуже. Это, по-видимому, связано с неточностью определения коэффициента фильтрации и угла наклона берега в зоне наката волны. Но качественно эксперимент подтвердил ещё один важный теоретический результат – существование локального максимума на кривой 2 для среднего уровня для наклонного берега [20], который отсутствует в случае отвесного берега [9].

6. Пампинг-эффект в задаче Стефана о росте льда

Рассмотрим задачу теплопроводности для льда, которая является основополагающей в теории Стефана о росте льда. Коэффициент температуропроводности $F(T)$ для пресноводного льда является дробно-линейной функцией от температуры льда [10]:

$$F(T)=k(T)/[C_p(T)c_{ice}], \quad (6.1)$$

где

$$\begin{aligned} k(T) &= 5,35 \times 10^{-3} (1 - 4,8 \times 10^{-3} T) \text{ кал}/(\text{°C см с}), \\ C_p(T) &= (0,5057 + 0,0018664 T) \text{ кал}/(\text{г °C}). \end{aligned} \quad (6.2)$$

До членов второго порядка можно записать

$$F(T) = C_1 + C_2 T + C_3 T^2, \quad (6.3)$$

где $C_1 = 1,0578 \times 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$, $C_2 = -8,9922 \times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}/\text{°C}$, $C_3 = 1,8788 \times 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}/(\text{°C})^2$.

С учётом (6.1) – (6.3) имеем уравнение теплопроводности для льда

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(C_1 + C_2 T + C_3 T^2) \frac{\partial T}{\partial z} \right]. \quad (6.4)$$

В дальнейшем членом $C_3 T^2$ в (6.4) будем пренебрегать в виду его малости по сравнению с двумя предыдущими.

Найдём стационарный фоновый поток тепла через лёд при условии, что температура на поверхности льда постоянная или очень медленно меняющаяся. Из (6.4) будем иметь уравнение

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[(C_1 + C_2 T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = 0, \quad (6.5)$$

с граничными условиями:

$$T|_{z=0}=T_0, T|_{z=h}=0, \quad (6.6)$$

где h – нижняя граница льда.

Интегрируя (6.5) по z , получим

$$(C_1+C_2T)dT=\tilde{C}_1dz. \quad (6.7)$$

Интегрируя ещё раз левую и правую части (6.7), будем иметь

$$C_1T+1/2C_2T^2=\tilde{C}_1z+\tilde{C}_2, \quad (6.8)$$

где \tilde{C}_1 и \tilde{C}_2 – константы интегрирования.

Подставляя (6.8) в граничные условия (6.6), получим

$$\tilde{C}_2=C_1T_0+1/2C_2T_0^2, \quad \tilde{C}_1=-\tilde{C}_2/h. \quad (6.9)$$

Откуда получим для потока тепла через выражение:

$$G_{ice}^{(T)}=\rho_{ice}C_p(T)(C_1+C_2T)\frac{\partial T}{\partial z}=-\frac{\rho_{ice}C_p(T)}{h}\left(C_1T_0+\frac{1}{2}C_2T_0^2\right). \quad (6.10)$$

Первообразная функция от $F(T)$ в (6.5) будет

$$\Psi(T)=C_1T+\frac{C_2}{2}T^2. \quad (6.11)$$

Таким образом, для определения значения температуры $T^{(\infty)}$ при вычислении инварианта получим из (6.11) квадратное уравнение. Если учитывать член C_3T^2 в (6.4), то для $T^{(\infty)}$ будем иметь кубическое уравнение.

Перейдём к вычислению пампинг-эффекта. Для этих целей приведем уравнение (6.4) к безразмерному виду, введя безразмерные переменные со штрихом

$$T=\tilde{T}T', t=\tau t', z=Hz'. \quad (6.12)$$

Подставляя (6.12) в (6.4), будем иметь

$$\frac{\partial T'}{\partial t'}=\frac{\partial}{\partial z'}\left[\left[\frac{\tau}{H^2}C_1+\frac{\tau\tilde{T}}{H^2}C_2T'+\frac{\tau\tilde{T}^2}{H^2}C_3(T')^2\right]\frac{\partial T'}{\partial z'}\right]. \quad (6.13)$$

Зададим характерные масштабы величин в (6.12): $\tau=4$ часа (масштаб срочных измерений температуры воздуха), $\tilde{T}=1^\circ\text{C}$, $H=10$ см, тогда будем иметь характерные значения безразмерных констант: (6.13)

$$\frac{\tau}{H^2}C_1\approx 1,52, \quad \frac{\tau\tilde{T}}{H^2}C_2\approx -1,29\cdot 10^{-2}, \quad \frac{\tau\tilde{T}^2}{H^2}C_3\approx 2,7\cdot 10^{-5}. \quad (6.14)$$

Из (6.14) видно, что в уравнении (6.13) действительно достаточно оставить только два первых слагаемых. В результате будем иметь безразмерную форму уравнения (6.4) (штрихи далее опускаем):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(\alpha + \varepsilon \beta T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (6.15)$$

где $\alpha = \tau C_1 / H^2 \sim O(1)$, $\beta = (t \tilde{T} C_2 / H^2) \times 10^2 \sim O(1)$, $\varepsilon = 0,01$.

Граничные условия:

на поверхности льда:

$$T|_{z=0} = T_0 + T_1 \cos(\omega t), \quad (6.16)$$

на границе вода-лёд $z=l=H$:

$$T|_{z=l} = 0, \quad (6.17)$$

где $T_0 = T_0^{(a)} / \tilde{T}$, $T_1 = T_1^{(a)} / \tilde{T}$, $\omega = \omega^{(a)} \tau$, $T_0^{(a)}$ и $T_1^{(a)}$ – среднее значение и амплитуда колебания температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$), $\omega^{(a)}$ – частота колебаний температуры воздуха (1/ч).

Решение (6.15) – (6.17) ищем в виде асимптотического ряда по малому параметру ε :

$$T = T^{(0)} + \varepsilon T^{(1)} + \varepsilon^2 T^{(2)} + \dots \quad (6.18)$$

Ограничимся в (6.18) членами первого порядка по ε . Подставляя (6.18) в (6.15) и отбрасывая слагаемые, начиная с ε^2 , получим уравнение для нулевой степени ε^0 :

$$\frac{\partial T^{(0)}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T^{(0)}}{\partial z^2}. \quad (6.19)$$

с граничными условиями:

на поверхности льда:

$$T^{(0)}|_{z=0} = T_0 + T_1 \cos(\omega t), \quad (6.20)$$

на границе вода-лёд $z=l$:

$$T^{(0)}|_{z=l} = 0, \quad (6.21)$$

В соответствии с граничными условиями (6.20) ищем решение в виде суммы стационарной и волновой частей. В результате получим:

$$T^{(0)} = T_0 \left(1 - \frac{z}{l} \right) + \frac{T_1}{2} \left[Q(z) e^{-i\omega t} + Q^*(z) e^{i\omega t} \right], \quad (6.22)$$

где

$$Q(z) = \frac{\sinh[\gamma(l-z)]}{\sinh(\gamma l)}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha}}. \quad (6.23)$$

Звёздочка в (6.22) означает комплексно-сопряжённое выражение.

Для членов порядка ε имеем уравнение:

$$\frac{\partial T^{(1)}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\beta}{2} \frac{\partial^2 (T^{(0)})^2}{\partial z^2} \quad (6.24)$$

с нулевыми граничными условиями:
на поверхности льда:

$$T^{(1)}|_{z=0}=0, \quad (6.25)$$

на границе вода-лёд $z=l$:

$$T^{(1)}|_{z=l}=0, \quad (6.26)$$

Вычислим $(T^{(0)})^2$ в (6.24), получим

$$\begin{aligned} (T^{(0)})^2 = & T_0^2 \left(1 - \frac{z}{l}\right)^2 + \frac{T_1^2}{2} Q(z)Q^*(z) + \frac{T_1^2}{2} (Q^2(z)e^{-2i\omega t} + (Q^*(z))^2 e^{2i\omega t}) + \\ & + T^{(0)}T^{(1)} \left(1 - \frac{z}{l}\right) [Q(z)e^{-i\omega t} + Q^*(z)e^{i\omega t}]. \end{aligned} \quad (6.27)$$

Из (6.27) следует, что функция источника в (6.24) содержит стационарную часть и волновые части с частотами ω и 2ω . Как следует из (1.15), толщина льда, на которую проникают волновые возмущения от поверхности, равна

$$L_{(+)} = \left(\frac{C_1}{2\omega}\right)^{1/2}. \quad (6.28)$$

Подставляя в (6.28) значение C_1 из (6.3), получим для суточных колебаний температуры на поверхности льда $L_{(+)} \sim 8,5$ см, а для синоптических колебаний 7 суток – $L_{(+)} \sim 23$ см. Ограничиваясь периодами колебаниями температуры воздуха не более синоптического масштаба, будем рассматривать толщины льда более 25 см. Тогда на нижней границе льда температурные волны, возбуждаемые функцией источника (6.27), будут затухать и тепловой поток будет определяться только стационарной частью выражения (6.27). В результате для стационарной части $T^{(1)}$ в (6.24) будем иметь уравнение:

$$\alpha \frac{\partial^2 T^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\beta}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[T_0^2 \left(1 - \frac{z}{l}\right)^2 + \frac{T_1^2}{2} Q(z)Q^*(z) \right] = 0. \quad (6.29)$$

с нулевыми граничными условиями (6.25), (6.26). Решая уравнение (6.29) с учетом (6.25) и (6.26), получим выражение для стационарной части $T^{(1)}$:

$$\begin{aligned} T^{(1)} = & -\frac{\beta}{2\alpha} \left\{ T_0^2 \left(1 - \frac{z}{l}\right)^2 - T_0^2 + \frac{T_1^2}{2} (Q(z)Q^*(z) - Q(0)Q^*(0)) - \right. \\ & \left. - \frac{z}{l} \left[\frac{T_1^2}{2} Q(l)Q^*(l) - T_0^2 - \frac{T_1^2}{2} Q(0)Q^*(0) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.30)$$

Таким образом, поток тепла (безразмерный) на нижней границе льда с точностью до $O(\epsilon^2)$ будет равен

$$G = -\frac{1}{l} \left[\alpha T_0 + \frac{\epsilon \beta}{2} \left(T_0^2 + \frac{T_1^2}{2} \right) \right], \quad (6.31)$$

или в размерных переменных

$$G_{ice}^{(T)} = -\frac{\rho_{ice} C_p(T)}{h} \left[C_1 T_0 + \frac{C_2}{2} \left(T_0^2 + \frac{T_1^2}{2} \right) \right]. \quad (6.32)$$

Сравнивая (6.32) с (6.10), получим, что добавка в поток тепла через лёд за счёт пампинг-эффекта составляет

$$G_{ice}^{(+)} = -\frac{\rho_{ice} C_p(T) C_2 T_1^2}{4h}. \quad (6.33)$$

Учитывая, что линейная поправка в формуле для $C_p(T)$ мала, пренебрежем зависимостью $C_p(T)$ от T , т.е. положим $C_p(T) \approx C_{p0} = 0,5057$ кал/(г $^\circ$ С). Тогда условие Стефана для скорости изменения нижней границы льда будет иметь вид

$$\rho_{ice} L_{ice} \frac{dh}{dt} = -\frac{\rho_{ice} \tilde{C}_p}{h} \left[C_1 T_0 + \frac{C_2}{2} \left(T_0^2 + \frac{T_1^2}{2} \right) \right]. \quad (6.34)$$

Интегрируя (6.34) и учитывая, что $T_0 = \frac{1}{t} \int_0^t T dt$, получим основную формулу для роста льда, обобщающую формулу Стефана,

$$h^2 = -\frac{2\tilde{C}_p}{L_{ice}} \left[C_1 \int_0^t T dt + \frac{C_2}{2} \left(\frac{1}{t} \left(\int_0^t T dt \right)^2 + \frac{t T_1^2}{2} \right) \right]. \quad (6.35)$$

Первое слагаемое в (6.35) – т.н. градусодни, которые входят в формулу Стефана [34]. Видно, что в добавление к формуле Стефана в (6.35) появляются ещё два слагаемых, обусловленных нелинейностью уравнения теплопроводности для льда (6.1), (6.2) и наличием волновой составляющей в граничном условии (6.20). Последнее слагаемое в (6.35) является пампинг-эффектом, возникающим из-за колебания температуры воздуха. Таким образом, с учётом нелинейности и пампинг-эффекта скорость нарастания льда будет больше, нежели по формуле Стефана.

Проанализируем формулу (6.35) применительно к экспериментальным данным. В работах [1, 22] описаны результаты

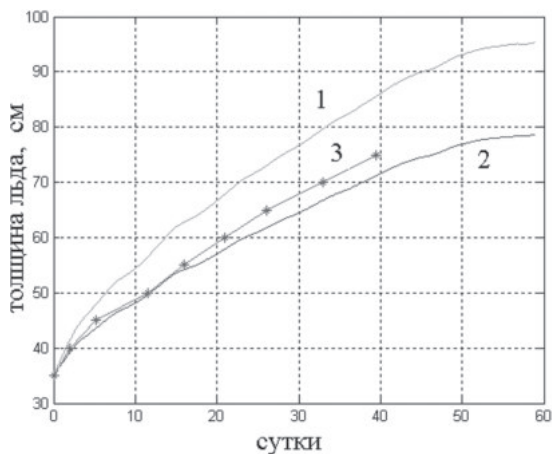


Рис. 7. Расчётные графики нарастания льда с использованием данных работы [1]: 1 – расчёт по формуле Стефана (1), 2 – по формуле Стефана с учётом поправки на поток тепла из воды в лёд на нижней границе льда [1], 3 – реальная толщина льда

эксперимента, проведённого в зимний период на Байкале. Авторы измерили с помощью гирлянды термисторов потоки тепла в ледяном покрове и в прилегающем снизу слое воды. В результате появилась возможность оценить поток тепла снизу из воды в лёд. Простой расчет нарастания льда на Байкале по формуле Стефана по значениям температуры на поверхности льда через градусодни дал сильно завышенные результаты (рис. 7, кривая 1).

Одна из главных причин этого – неучёт в формуле Стефана потоков тепла снизу из воды в лёд. По данным работы [1] этот поток является существенным и составляет от 18 до 65% от общего потока тепла через лёд в разные периоды времени. Если ввести в формулу корректировку на эту среднюю величину потока тепла из воды в лёд за период наблюдения, то получаются уже заниженные результаты (рис. 7, кривая 2). Последнее указывает на то, что должен быть ещё дополнительный неучтённый отток тепла из зоны кристаллизации льда, который должен ускорять нарастание льда. Такой поток действительно есть и он описывается дополнительными слагаемыми в (6.35), обусловленными эффектами нелинейности и пампинг-эффекта. Оценки показали, что добавка за счёт нелинейности и пампинг-эффекта в (6.35) для условий эксперимента на Байкале [1] ($T_0 \approx 10^\circ\text{C}$ и $T_1 \approx 4^\circ\text{C}$) может составлять от 9% до 14% от

слагаемого Стефана в (6.35). Это как раз та величина, которая убирает разницу между теоретической кривой 2 и экспериментальными данными (график 3) на рис. 7.

Из (6.33) видно, что пампинг-эффект для колебательных процессов во льду (включая ледники, многолетнюю мерзлоту) является отрицательным. Это означает, что тепло будет откачиваться из нижних слоёв ледового массива при увеличении амплитуды колебания температуры на его верхней границе. В зоне многолетней мерзлоты этот эффект может достигать существенных значений. К примеру, амплитуда внутригодовых колебаний температуры воздуха в Якутии достигает $T_1=40^\circ\text{C}$ и тогда понижение температуры во внутренней области мерзлоты составит существенную величину $T^{(-)}=-1,9^\circ\text{C}$.

Выводы

Как следует из данной работы, природные процессы, описываемые нелинейными параболическими уравнениями типа нелинейного уравнения теплопроводности с коэффициентом теплопроводности, являющимся функцией от искомой характеристики среды, довольно разнообразны. При наличии колебаний в такой системе, а они в природных процессах всегда есть, начинает проявляться пампинг-эффект.

Пампинг-эффект в динамике приливных волн на мелководье приводит к повышению среднего уровня воды на побережье. В устьях рек этот эффект даёт увеличение зоны подпора уровня воды в реке.

Морские воды проникают в устья рек в виде придонного клина соленых вод. В устьях рек, впадающих в приливные моря, пампинг-эффект может приводить к более глубокому проникновению солёных вод в устья рек по сравнению с тем, если бы этого прилива не было. Численные расчёты показали, что это увеличение дальности проникновения соленостного клина может достигать по сравнению с бесприливным морем нескольких километров.

Аналогичный эффект проявляется в процессе интрузии морских вод в подземные горизонты в приливных морях. Пампинг-эффект работает, как насос, осуществляющий накачку воды в слой.

Приложение пампинг-эффекта к теплосодержанию глубинных вод морей, океанов и глубоководных озёр показывает, что вариации

амплитуды колебания поверхностной температуры (ТПО) приводят либо к закачке тепла в глубинные слои, либо, наоборот, к откачке тепла из глубинных слоёв в зависимости от того, уменьшается или увеличивается амплитуда вариаций ТПО. Оценки показывают, что пампинг-эффект играет роль важного нелинейного механизма перераспределения потоков тепла на Земле. Дополнительный поток тепла из глубинных слоёв океана за счёт пампинг-эффекта может составлять около $0,18-0,25 \text{ Вт/м}^2$.

Пампинг-эффект влияет и на распределение температуры во льдах, ледниках, многолетней мерзлоте. Коэффициент теплопроводности пресного льда является линейной убывающей функцией от температуры. Пампинг-эффект для льда отрицателен, поэтому температура внутри ледового массива должна быть меньше среднего значения на поверхности льда. В зоне многолетней мерзлоты этот эффект может достигать существенных значений. К примеру, среднегодовая температура воздуха в Якутске в Сибири составляет минус $8,9-9,3^\circ\text{C}$. Такая же должна быть температура мёрзлых грунтов на глубине, где годовые колебания температуры исчезают. Как известно, на глубинах 10 м температура мёрзлых грунтов ниже и составляет минус $10-15^\circ\text{C}$. По формуле (6.30) получим понижение температуры в данном регионе на глубине 10 м на минус $1,9^\circ\text{C}$ от среднего значения минус $8,9-9,3^\circ\text{C}$, что составит величину порядка минус 11°C . Если учесть зависимость теплоёмкости льда C_p от температуры, то понижение температуры мёрзлых грунтов за счёт пампинг-эффекта может достигнуть ещё больших величин – до минус $3-4^\circ\text{C}$.

Учёт нелинейности уравнения теплопроводности для льда и колебаний температуры воздуха приводит к новому закону роста льда, обобщающему известную формулу Стефана. Помимо слагаемого с градусоднями в классической формуле Стефана новая формула содержит еще два дополнительных слагаемых, обусловленных нелинейностью уравнения теплопроводности для льда и пампинг-эффектом. Возникновение пампинг-эффекта указывает, что расчёт нарастания льда по осреднённым значениям температуры воздуха не совсем корректен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асламов И.А., Козлов В.В., Мизандронцев И.Б., Кучер К.М., Гранин Н.Г. Оценка потока тепла на границе вода–лёд на Байкале по

экспериментальным данным // Доклады АН. Т. 457, №4, 2014. С. 477–480.

2. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 254 с.

3. Галеркин Л.И., Бараш М.Б., Сапожников В.В., Пастернак Ф.А. Тихий океан. М.: Мысль, 1982. 318 с.

4. Дийкстра Х. Нелинейная физическая океанография. М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2007. 680 с.

5. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.

6. Зырянов В.Н. Гидродинамика солёностного клина // Водные ресурсы. №6. 1987. С. 107–125.

7. Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М.: ИВП РАН, 1995. 240 с.

8. Зырянов В.Н. Антипотепление глубинных вод Мирового океана // Океанология. Т. 47, №5, 2007. С. 666–673.

9. Зырянов В.Н. Нелинейный пампинг-эффект в колебательных процессах в геофизике // Водные ресурсы. Т. 40, №3, 2013. С. 227–239.

10. Зырянов В.Н., Жмур В.В., Фомин Ю.В. Нелинейная волновая интрузия вод в береговые подземные горизонты: теория, эксперимент // Труды Конференции «Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения», Сочи, 2 – 7 октября 2017 г.

11. Зырянов В.Н., Круглихин С.А. Нелинейный пампинг-эффект в задаче Стефана о нарастании льда // Процессы в геосредах. №4, 2016. С. 318–327.

12. Зырянов В.Н., Музылев С.В. Нелинейная накачка уровня приливов на мелководье // ДАН СССР. Т. 298, №2, 1988. С. 454–458.

13. Зырянов В.Н., Хублярян М.Г. Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложение в геофизике // ДАН. Т. 408, № 4, 2006. С. 535–538.

14. Зырянов В.Н., Фролов А.П., Хублярян М.Г. Некоторые нелинейные режимы фильтрации грунтовых вод // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. №5, 2009. С.109–119.

15. Зырянов В.Н., Чебанова М.К., Филатов Н.Н. Интрузия морских вод к устьям рек // Водные ресурсы. Т. 42, №5, 2015. С. 492–503.

16. Лейбензон Л.С. Подземная гидрогазодинамика. Собрание трудов. М.: Издательство АН СССР, 1953. 544 с.

17. Монин А.С., Нейман В.Г., Филюшкин Б.Н. О стратификации плотности в океане // ДАН СССР. Т. 191, №6, 1970. С. 1277–1279.

18. Олвер Ф. Асимптотика и специальные функции. М.: Наука, 1990. 528 с.

19. Покровский О.М. Температура поверхности океана как индикатор естественных колебаний климата в умеренных и высоких широтах Северного полушария // Исследование Земли из космоса. №6, 2005. С. 3–13.

20. Подубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.

21. Фомин Ю.В., Жмур В.В., Марченко А.В. Нестационарная фильтрация морских вод в водоносные слои прибрежной зоны моря // Водные ресурсы. Т. 44, №1, 2017. С. 19–27.

22. Aslamov I.A., Kozlov V.V., Kirillin G.B., Mizandroutsev I.B., Kucher K. M., Makarov M.M., Gornov A.Yu., Granin N.G.. Ice – water heat exchange during ice growth in Lake Baikal // J. of Great Lakes Research. V. 40, 2014. P. 599–607.

23. Buckmaster J. Viscous sheets advancing over dry beds // J. Fluid Mech. Vol. 81, 1977. P. 735–756.

24. Emery W.J., Lee W.G., Magaard L. Geographic distribution of density, Brunt-Vaisala frequency and Rossby radii in the North Pacific and North Atlantic // J. Phys. Oceanogr. 14. 1984. P. 294–317.

25. Gargett A.E. Vertical eddy diffusivity in the ocean interior // J. Mar. Res. 42(2). 1984. P. 359–393.

26. Larsen E.W., Pomraning G.C. Asymptotic analysis of nonlinear Mar-shak waves // SIAM J. Appl. Math. 39. 1980. P. 201–212.

27. Le Blond P.H. On tidal propagation in shallow rivers // J. Geophys. Res. Vol. 83, C 9, 1978. P. 4717–4721.

28. Levitus S., Antonov J., Boyer T., Stephens C. Warming of the World ocean // Science. 287. 2000. P. 2225–2229.

29. Muskat M. The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. New York: McGraw-Hill, 1937.

30. Philip J.R. Periodic nonlinear diffusion: an integral relation and its physical consequences // Australian J. Phys. Vol. 26, 1973. P. 513–519.

31. Reid G.C. Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record // J. Geophys. Res. – Atmos. Vol. 96, D 2, 1991. P. 2835–2844.

32. Shimaraev M.N., Troitskaya E.S. and Gnatovskiy R.Yu. 2009. Temperature change of deep waters of Baikal Lake in 1972 – 2007 years // Geography and Nature Resources. N 3, 2009. P. 68–76.

33. Stigebrandt A. A model for the vertical circulation of the Baltic deep water // J. Phys. Oceanogr. 17. 1987. P. 1772–1785.

34. Stefan J. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über Eisbildung in Polarmeere // Annalen der Physik. 3rd Ser. 42, 1891. P. 269–286.

35. Zyryanov V.N. Nonlinear pumping in oscillatory diffusive processes: The impact on the ocean deep layers and lakes // Commun. Nonlinear Sci Numer. Simulat. N 19, 2014. P. 2131–2139.

Исследование процессов переноса загрязняющих веществ в водных объектах: теория и эксперимент

*В.Ф. Бреховских, В.М. Перекальский, З.В. Волкова,
В.С. Брезгунов, Г.Н. Вишневецкая, Е.Р. Кременецкая*

Исследование кислородного режима водных объектов

Интенсивные исследования качества воды в водных объектах (реки, озёра, водохранилища, внутренние моря) начались в 1950-е гг. Это было связано с резким увеличением объёмов неочищенных сточных вод (промышленных и бытовых), сбрасываемых в водоёмы и переносимых течениями на значительные расстояния. Как правило, эти воды содержали значительное количество различных органических веществ (ОВ), в том числе лабильной органики. На биохимическое окисление этой органики расходовалось большое количество растворённого кислорода (РК), что приводило к нарушению кислородного режима и возникновению заморных явлений как летних, (главным образом в стратифицированных водоёмах), так и зимних, которые наблюдались даже в достаточно крупных реках. Естественно, кислородный режим водных объектов детально исследовался в первую очередь экспериментально. Но в то же время стало очевидно, что необходима разработка математических моделей для описания этого режима. В качестве примера можно назвать одномерную модель переноса кислорода из атмосферы в поверхностный слой воды и далее за счёт вертикальной адвекции и диффузии в нижние слои воды (Snodgrass, 1983). Модель такого типа была использована нами для расчёта кислородного режима евтрофного водоёма в период ледостава, где к концу зимы в придонных слоях может возникнуть обширная анаэробная зона (Бреховских, Юшманова, 2002).

Задача решалась аналитически при соответствующих начальном и граничном условиях с учётом потребления кислорода в воде и донными отложениями. Как показали расчёты, после достижения нулевой концентрации кислорода у дна наряду с дальнейшим снижением содержания кислорода в столбе воды происходит подъём анаэробной зоны, который продолжается до полного исчезновения кислорода.

Модель, в которой использовались реальные величины параметров, вполне адекватно отразила реальные процессы, происходящие зимой в евтрофных водоёмах. Это показало сопоставление результатов расчёта с данными натурных наблюдений на оз. Белом. Экспериментальные точки, полученные через 128 дней после начала ледостава, достаточно близки к расчётной кривой, соответствующей 134 суткам.

Для водотоков, как правило, уравнение, описывающее динамику РК, сочетается с уравнением, описывающим изменение содержания органических веществ (ОВ) в воде, и оба этих уравнения составляют основу модели качества воды. Поэтому принято говорить о моделях «растворенный кислород – биохимическое потребление кислорода», или РК-БПК моделях.

Одной из ранних моделей качества воды является модель Стритера-Фелпса, представляющая собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Модернизированный вариант модели с переменными коэффициентами и с учётом различных стоков кислорода, был предложен в работе (Dobbins, 1972).

Эта модель была использована нами для оценки влияния сброса неочищенных сточных вод ЦБК на кислородный режим р. Сухоны, притока Северной Двины (Бреховских, Вольпьян, 1991, (Brekhovskikh, Volpian, 1991). В результате поступления сточных вод величины БПК₅ в верхней части реки могут достигать экстремальных значений (25–42 мгО₂/л). Следствием этого является увеличение дефицита растворённого кислорода (ДПК) на расположенных ниже участках реки в летний период и, особенно, в период ледостава.

Расчёты проводились при следующих допущениях: водный поток стационарный; биохимическое окисление ОВ описывается уравнением реакции 1-го порядка; основной механизм поступления кислорода обусловлен только реаэрацией в летний период (фотосинтез пренебрежимо мал, что было показано нами экспериментально в ходе экспедиционных работ на р. Сухоне). Гидравлические характеристики реки сильно меняются по её длине, что заметно отражается на величине модельных коэффициентов (Бреховских, 1988). Поэтому река была разбита на несколько участков, в пределах каждого из которых были определены средние величины глубины и скорости потока для летней межени (общая длина участка 520 км).

В соответствии с этим определяли величины коэффициентов биохимического окисления и реаэрации как функции скорости и глубины по длине реки. На основании данных лабораторных опытов по кинетике БПК и данных по БПК₅, полученных постами УГМС на реке за период 1967–82 гг., были определены значения БПК₂₀, которые закладывались в расчёт в качестве величины начальной концентрации ОВ для лета и зимы, а также величины начального ДРК. Другие параметры модели определялись экспериментально.

Как показали расчёты, в летний период на кривой ДРК наблюдается явно выраженный максимум, что характерно для водотока, где имеется сосредоточенный источник загрязнения. Зимой, при отсутствии реаэрации, кривая ДРК демонстрирует монотонный рост. Оценки ассимиляционной способности реки с помощью модели и экспериментальных данных показали, что в зимнее время имеет место трёхкратное превышение предельных нагрузок на водоток, что приводит к снижению содержания кислорода на нижнем участке реки до 0,6 мгО₂/л.

Модельный комплекс для оценки последствий аварийных сбросов сточных вод

При разработке математических моделей физическое содержание изучаемой задачи формулируется с помощью замкнутой системы дифференциальных уравнений совместно с известными граничными и начальными условиями. Современный уровень математического обеспечения ЭВМ позволяет использовать математические модели в виде программного комплекса, с помощью которого осуществляется не только расчёт, но и выдача результатов в наиболее информативном виде. Здесь рассмотрен один из вариантов, разработанных нами программных комплексов, в постановке «мелкой воды». Характерная особенность метода, который используется в данном программном комплексе, состоит в реализации принципов, возникших первоначально при решении уравнений газовой динамики. Это возможно, поскольку уравнения мелкой воды над горизонтальным дном при отсутствии диссипации и ускорения Кориолиса с точностью до обозначений совпадают с уравнениями для баротропных течений газа с показателем адиабаты, равным двойке. Важным моментом при создании этого метода является использование точного решения соответствующей автомодельной задачи в

численном алгоритме. Благодаря этому подходу удаётся преодолеть сложности расчёта течений при образовании в них гидравлических прыжков, при течении по сухому дну (выход волны на берег при наводнении), при больших градиентах искомых величин, а также русел с переменным рельефом дна. Помимо расчёта течения и массопереноса в программном комплексе предусмотрено применение метода прямого статистического моделирования для расчёта поверхностного растекания лёгкой фракции нефти под воздействием течения и ветра. В расчётах учитывается наличие загрязняющих веществ (ЗВ) двух типов: консервативных и неконсервативных.

Комплекс в своём развитии прошёл несколько этапов модернизации и в настоящее время включает три блока – гидродинамический, массопереноса и, удобный для пользователя, интерфейс, созданный на основе ГИС ArcView 3.2 (язык Avenue). Интерфейс упрощает технологию расчёта с учётом всех основных факторов – расход воды в реке, количество поступивших ЗВ, место и время сброса, температура воды, морфология водного объекта и др. Задание протокола момента и места аварии и её характеристик осуществляется пользователем также через интерфейс с использованием электронной карты водного объекта. Результаты расчёта выдаются в виде кадров микрофильма, которые записываются на диск с указанием времени и со шкалой концентрации загрязняющего вещества.

Основой представленной модели является система дифференциальных уравнений динамики и массопереноса. Для описания динамики использовалась система уравнений мелкой воды, записанная в интегральной форме. Система двумерных уравнений «мелкой воды» в интегральной форме на произвольной поверхности σ (объём V) в пространстве (x, y, t) имеет вид:

$$\varphi = \begin{bmatrix} UH \\ UH \\ VH \end{bmatrix}; \quad P = \begin{bmatrix} \int_{\sigma} \rho U V dy + \rho g/2 H^2 \\ UVH \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} \int_{\sigma} U dx dt + \int_{\sigma} V dx dy dt \\ V^2 H + g/2 H^2 \end{bmatrix}; \quad \Psi = \begin{bmatrix} 0 \\ gH \frac{\partial z_0}{\partial x} + \tau_x \\ gH \frac{\partial z_0}{\partial y} + \tau_y \end{bmatrix}$$

где:

где H – глубина потока жидкости, м; U, V – соответствующие составляющие по осям координат x, y осреднённого по глубине вектора скорости U , м/сек; z_0 – отметка дна, м; τ_x, τ_y – компоненты касательных напряжений на дне водоёма.

Уравнение массопереноса для искомой скалярной функции C (например, значения содержания органики, величины дефицита растворённого кислорода, температура воды) имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + F,$$

где F – источники ЗВ.

Вид уравнений для наглядности представлен в декартовых координатах, в численном расчёте дискретный аналог решаемых уравнений преобразован на косоугольной сетке, адаптированной к линии берегов и дну водного объекта.

Более подробно постановка задачи изложена в работах [Бреховских, Перекальский, 2002; Перекальский, Абрамов, 2012].

В программном комплексе предусмотрен блок по расчёту динамического взаимодействия двух водных потоков в месте их слияния. Это позволяет в принципе рассчитывать сеть водных объектов по их динамическому взаимодействию и переносу загрязняющих веществ.

Представленная выше модель использовалась для оценки опасности возникновения анаэробной зоны на 550-км участке реки Северная Двина от места слияния рек Вычегды и Малой Северной Двины в результате аварийного сброса ЗВ из очистных сооружений Котласского ЦБК (Бреховских, Перекальский, 2000). Моделировалась ситуация, когда в течение достаточно короткого промежутка времени (10 часов) в реку поступали сточные воды с расходом $17,8 \text{ м}^3/\text{сек}$, в два раза превышающим режимный, и с содержанием ЗВ 750 мг/л . Расчёты проводились для зимней межени при среднемноголетних величинах расходов воды в указанных реках при определённых фоновых значениях содержания органики (L) и величины ДРК (D) и коэффициента биохимического окисления.

В результате расчётов были получены поля распределения компонентов скорости, глубины потока и величин L и D на участке реки от р. Вычегды до р. Пинеги. Было показано, что зона загрязнения при своём движении дрейфует от берега к берегу из-за меандрирования русла, причём полное перемешивание наступает на 80 км от исходного створа через 200 часов после окончания сброса. При этом дефицит кислорода в центре облака ЗВ увеличивается на $0,5\text{--}0,7 \text{ мг/л}$

по сравнению с его естественным значением, а само облако растягивается по длине более, чем на 200 км. Таким образом, проведенные расчеты показали, что аварийные сбросы сточных вод в зимний период оказывают существенное влияние на гидрохимический режим Северной Двины.

Следующим объектом исследования с помощью описанного выше программного комплекса является устьевой участок Северной Двины, где помимо адекватного учета морфологии и двухмерного характера распространения ЗВ, следует учитывать влияние на динамику потока приливных явлений (Бреховских, Перекальский, 2002). Исследовался процесс распространения ЗВ, поступающих в реку со сточными водами Архангельского ЦБК (главным образом через подводный рассеивающий выпуск). Этот выпуск находится у левого берега реки в 15 км выше г. Архангельска. Необходимость проведения модельных расчётов была обусловлена тем, что ниже по течению на правом берегу расположен главный городской водозабор (2-й км по лощи).

Как показали натурные исследования (Бреховских, Овечкина, 1988), в период открытой воды сточные воды распространяются вдоль левого берега довольно узкой полосой, что подтверждается измерениями концентраций различных органических веществ. Однако эта картина заметно меняется в период зимней межени, когда повышенные концентрации ЗВ часто наблюдались на середине реки и даже у её правого берега (Бреховских, Волкова, Колесниченко, 2003). В связи с этим особую опасность представляет ситуация, когда со сточными водами в реку попадают опасные токсические вещества. Такая ситуация, в частности, возникла зимой 1995 г., когда в результате нарушения режима промывки электролизеров в воду попало большое количество ртути (по разным источникам, до нескольких сотен кг.). Очевидно, что прогноз распространения токсиканта и оценка вероятности его попадания в район водозабора могут быть выполнены только с помощью математического моделирования.

Расчётная схема оставалась прежней, но с некоторыми изменениями в граничных условиях. Рассеивающий выпуск ЗВ моделировался заданием соответствующей функции в правой части уравнения массопереноса (3).



Рис. 1. Схема расчётного участка и поле концентраций лигнинных веществ через четверо суток после начала работы рассеивающего выпуска: 1–5 мг/л; 2–10 мг/л; 3–15 мг/л; 4–30 мг/л

Задача гидродинамики решалась на 70-км устьевом участке с подробным описанием геометрии островов и береговой линии, благодаря использованию в дискретизации косоугольной сетки.

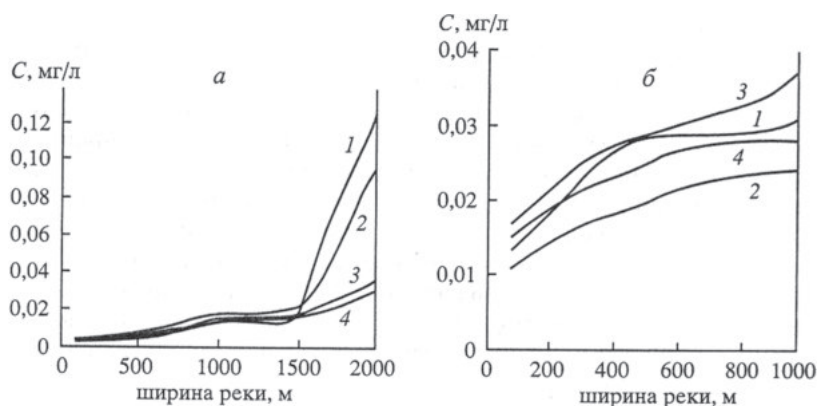


Рис. 2. Изменение концентрации ртути по сечению реки в зоне рассеивающего выпуска (а) и водозабора (б) через четверо суток при малой и полной воде: 1, 2 – соответственно, малая и полная вода второй полусуточной приливной волны; 3, 4 – соответственно, малая и полная вода второй полусуточной приливной волны. Отсчёт расстояния по сечению реки производится от правого к левому берегу

Следует отметить довольно сложный характер течений в указанном районе реки, что обусловлено взаимодействием двух потоков (Северной Двины и протоки Мечка), обтекающих систему островов. Эти острова разделены узкими протоками (при расчёте они были представлены в виде одного острова). Схема расчётного участка (0–33 км) представлена на рис. 1.

Рассматривались два варианта: распространение ЗВ (лигнинные вещества) при штатном режиме работы очистных сооружений ЦБК и аварийный сброс, при котором в воду попадает ртуть.

Сравнение результатов расчёта с данными натурных исследований (для летнего периода) показало хорошее совпадение в характере кривых в створе выпуска. Это означает, что модель адекватно описывает ситуацию в реке и с её помощью можно получить картину распределения ЗВ на данном участке реки.

Расчёт последствий аварийного сброса ртути со сточными водами проводился исходя из известных реальных сроков этого события (4 суток). Концентрация ртути в сточных водах принималась равной 5 мг/л, что вполне реально, особенно если учесть, что в тот период концентрация ртути в воде реки в районе выпуска достигала 0,3 мг/л, т.е. 300 ПДК. Результаты расчётов представлены на рис. 2, где показано распределение концентрации ртути по ширине реки в зонах рассеивающего выпуска и водозабора на четвертые сутки для разных фаз прилива. Как видно из рисунка, наблюдается различие в распределении концентрации поперёк реки как при малой, так и полной воде для 1-й и 2-й полусуточных волн прилива.

В зоне водозабора отмечается тенденция к уменьшению концентрации вблизи левого берега и её возрастание у правого берега (до 10–15 ПДК), что подтверждает наличие интенсивного поперечного переноса ЗВ от левого к правому берегу.

Поле скоростей рассчитывалось по уравнению динамики во всей рассматриваемой области с учётом системы островов. В итоге была получена подробная картина течений на участке реки как выше выпуска сточных вод, так и ниже него (вплоть до водозабора). Проведённый расчёт показал, что выше выпуска существует заметное поперечное течение воды, поступающей из протоки Мечка. Повидимому, этим можно объяснить наблюдаемые ранее экспериментально зимой повышение концентрации ЗВ на середине реки, а в

одном случае даже равномерное их распределение по всему сечению реки.

Таким образом, выполненные расчёты показали, что сочетание таких факторов, как приливной характер течения в Северной Двине и наличие поперечного адвективного переноса в зоне рассеивающего выпуска, при определённых условиях может способствовать возникновению угрозы загрязнения городского водозабора в период зимней межени.

Далее с помощью программного комплекса была предпринята попытка оценить влияние сточных вод крупного промышленного центра, г. Волгограда, на качество воды в Волге. Здесь помимо промышленных сточных вод рассматривалось воздействие поверхностного ливневого стока с территории города (Бреховских, Кочарян, Перекальский, 2002). В качестве ЗВ рассматривались соединения меди, содержащиеся в сточных водах, и нефтепродукты, которые преобладают в ливневом стоке. В первом случае рассматривались два варианта: работа очистных сооружений в штатном режиме и аварийный сброс. Проведённые расчёты показали, что при штатном режиме сбросов промышленных сточных вод г. Волгограда ($2 \text{ м}^3/\text{с}$, содержанием меди $C=10$ ПДК), зона загрязнения распространяется на сравнительно малое расстояние вниз по течению (до 3 км.). В варианте увеличенного аварийного сброса промышленных сточных вод (до $10 \text{ м}^3/\text{с}$) с содержанием меди $100 \text{ мг}/\text{м}^3$ время сброса предполагалось неограниченным (стационарный источник). Расчётное поле концентраций показывает, что расстояние полного перемешивания составляет 50 км, а фоновое значение достигается через 80 км от места сброса.

С учётом общей площади города, доли непроницаемого покрытия, средней продолжительности осадков и частоты максимальных суточных осадков (20% обеспеченности) была получена оценка расхода максимального ливневого стока ($31,5 \text{ м}^3/\text{с}$) при концентрации нефтепродуктов $20 \text{ г}/\text{м}^3$. Видно, что загрязнённая зона смещается вниз вдоль правого берега, постепенно расширяясь поперёк русла. Полное перемешивание по сечению реки происходит на расстоянии 140 км от Волгограда на третьи сутки после окончания ливня. При этом концентрация нефтепродуктов здесь превышает ПДК ($0,05 \text{ г}/\text{м}^3$) в 2–2,5 раза. Таким образом, расчёты с помощью модели показывают,

что ливневый сток с городских территорий может оказывать заметное влияние на качество воды на значительном расстоянии от города.

С помощью комплекса исследований влияние аварийного выпуска нефти на участке Нижней Волги от пос. Черный Яр до пос. Никольское, протяжённостью 45 км (Бреховских, Перекальский, Абрамов и др. 2010). Сброс (7 т/сут.) происходил в течение одних суток, затем авария устранялась. При расходе воды в реке 4000 м³/с (летне-осенняя межень крайне маловодного года) облако нефти распространялось вниз по течению с понижением концентрации до 3 ПДК к концу расчётного участка. В конце третьих суток после аварии концентрация нефти снижается до фоновой (2 ПДК). При увеличении сброса до 44 т/сут. облако загрязнения в конце вторых суток проходит в районе Никольского с максимальным значением концентрации нефти 4 ПДК вблизи правого берега и значительным распространением поперёк русла. Если расход воды составляет 6000 м³/с, загрязнение распространяется на значительно большее расстояние, при этом в конце вторых суток наблюдается заметное снижение концентрации нефти в пятне (до 2–3 ПДК) в районе Никольского (фоновая концентрация достигается за 3–4 суток).

Следующая задача была связана с оценкой последствий возможного аварийного разлива нефти на 250 километровой участке Волги от г. Нижний Новгород до Чебоксарского гидроузла (Перекальский, Абрамов, 2012, Перекальский, Абрамов, Авандеева, 2012) На этом участке в Волгу впадают два крупных притока – реки Сура и Ветлуга (с расходами воды, соответственно 260 и 255 м³/с). Расход воды в Волге принимается равным 3000 м³/с. Высокий риск нефтяного загрязнения низовьев Суры и Чебоксарского водохранилища связан, главным образом, с тем, что реку пересекают ветки магистрального нефтепровода. А известно, что коррозионные дефекты могут приводить как к проточкам, так и к крупномасштабным авариям. При проведении расчётов была построена в электронном виде гидрологическая схема течений с учётом особенностей русла, распределения глубин и наличия островов.

Первоначально оценивались последствия протечки из нефтепровода, пересекающего Суру в районе г. Ядрин (объём протечки 3,5 т/сут). Через сутки сброс нефти был прекращён, и облако нефти,

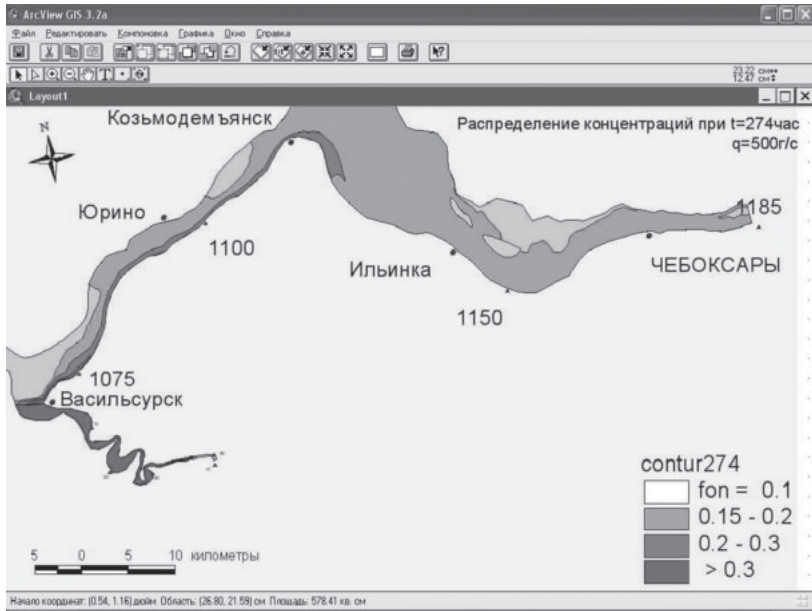


Рис. 3. Распространение нефти при её длительном истечении из нефтепровода в реке Сура

деформируясь, направилось к устью реки. При этом на мелководных участках движение нефти было замедленным по сравнению с глубоководными участками. В целом в результате разбавления и разложения концентрация нефти в воде становится фоновой ($0,1 \text{ г/м}^3$) ещё до слияния с Волгой.

Аналогичный расчёт был произведён при увеличении суточной утечки нефти до 45 т/сут . В этом случае отмечается увеличение концентрации нефти в Сура по сравнению с предыдущим. Через трое суток после начала утечки нефть попадает в Волгу. В месте слияния Суры и Волги концентрация нефти значительно уменьшается под влиянием менее загрязнённого потока Волги. Нефть прижимается течением к её правому берегу, и происходит дальнейшее разбавление. На мелководных участках Суры наблюдается длительное заставивание нефти. Так как через сутки после начала сброса нефти в Суру авария была устранена, на пятые сутки происходит повсеместное снижение концентрации и разрыв облака нефти. Через шесть суток концентрация у правого берега Волги достигает фоновой. Следует

отметить, что концентрация нефти в устье Суры на шестые сутки местами ещё больше $0,3 \text{ г/м}^3$, но это не приводит к увеличению концентрации нефти выше фоновой в Волге. При длительном (в пределах 20 суток) истечении нефти из нефтепровода во всей Суре и Волге ниже Васильурска наблюдается двух-трёхкратное превышение концентрации нефти над фоновой. Вблизи правого берега распространяется облако нефти с концентрацией, превышающей фоновую более чем в три раза, но протяжённость этого облака ограничена за счёт разбавления волжской водой (рис. 3).

Таким образом, используемая динамическая модель адекватно рассчитывает поля скорости течения на рассматриваемых участках водного объекта (Волга, Волга-Сура) с включением в расчётную схему перепадов глубин, островов, извилистости берегов. Влияние величины и направления скорости потока и морфологии водного объекта является определяющим в процессе распространения нефти и изменения её концентрации. Вследствие этого картина выглядит достаточно реально, в частности застаивание нефти на мелководных участках.

Экспериментальная оценка размеров зоны влияния Астрахани на гидрохимические показатели в рукавах дельты

Как видно из сказанного выше, с помощью соответствующей модели можно в некоторых случаях грубо оценить воздействие точечных источников загрязнения на качество воды в реке. Однако при исследовании влияния крупной промышленной агломерации, которую нужно рассматривать как распределённый источник ЗВ, возникают серьёзные трудности. В этой ситуации получить ответ можно только с помощью натурного эксперимента, что и было осуществлено в 2007–08 гг. Институтом водных проблем РАН в районе г. Астрахани. Целью экспедиционных исследований была оценка размеров зоны влияния города на гидрохимические показатели в рукавах дельты Волги. С корабля отбирались пробы воды и донных отложений, в которых определяли содержание тяжёлых металлов, нефтяных углеводородов, фенолов и других веществ (Проблемы качества вод..., 2013). Все анализы выполнялись по стандартным методикам. Всего было выбрано 30 створов, расположенных в русловой части реки выше и ниже города, а также по основным рукавам дельты. К югу от города это Бахтемир (крупная транспортная арте-

рия), Старая Волга и Кизань–Камызяк, а в северной части города это Болда (отходит от русла Волги в восточном направлении) и некоторые другие протоки.

Последующий анализ распределения гидрохимических показателей по длине рукавов дельты позволил примерно оценить зону влияния города на качество воды (Бреховских, Волкова, Перекальский, 2015).

Рассмотрим ситуацию в рукаве Бахтемир. Содержание углеводородов (УВ) на входе в рукав снижается по сравнению с содержанием в замыкающем створе о. Ильинский на южной границе города. Это снижение продолжается до створа пос. Бахтемир (примерно 10 км ниже по течению), затем в створе с. Икряное (еще 10 км ниже) концентрация УВ заметно возрастает (до 2 ПДК), далее через 12 км снижается до 1 ПДК (с. Ямное), а ещё через 14 км вновь возрастает до 3 ПДК (с. Трудфронт). Совершенно очевидно, что этот рост обусловлен какими-то другими источниками, а не влиянием г. Астрахани. Такое распределение концентраций даёт основание считать, что влияние города по УВ распространяется не более, чем на 25–30 км (если считать от южной границы города). Анализ изменения концентрации Hg и Cu в принципе подтверждает сделанный выше вывод.

Достаточно чётко выявляются размеры зоны влияния по распределению Zn. На входе в Бахтемир концентрация Zn несколько ниже, чем в замыкающем створе, далее она понижается до 10 мкг/л (1 ПДК) в створе пос. Бахтемир, а затем возрастает в 1,5 раза в с. Икряное. Этот рост продолжается и дальше к с. Ямное и с. Трудфронт, что говорит о действии местных источников загрязнения, а не г. Астрахани.

Рукав Болда, который отходит от русла Волги в северной части города через 2 км разветвляется на две протоки – Кривая Болда и Прямая Болда, которые обходят большой остров, вытянутый в широтном направлении примерно на 10 км, и вновь сливаются у восточного мыса острова.

Район Прямой Болды плотно заселён, здесь расположено множество промышленных предприятий, судоремонтный завод, причалы и т.д. Это обстоятельство заметно отражается на некоторых показателях качества воды, причём в основном в средней части протоки. Как и в предыдущем случае, антропогенное влияние города на качество воды для разных веществ проявляется по-разному. Так,

содержание Си на входе в рукав Болда из Волги соответствует ПДК, а затем оно возрастает до 3 ПДК в Кривой Болде и до 22 ПДК в середине Прямой Болды, но в месте их слияния оно снижается до 4 ПДК. Далее вниз по течению Болды оно продолжает снижаться до уровня 2 ПДК (через 12 км от этого места), а через 6 км вновь возрастает почти до 8 ПДК. Таким образом, влияние городской агломерации на уровень содержания Си распространяется не более, чем на 20 км.

Для Zn картина получается более смазанной, хотя и здесь его концентрация максимальна в середине Прямой Болды и заметно снижается к месту слияния. Дальше вниз по течению концентрация Zn несколько возрастает (с 14 до 17 мкг/л) и сохраняется в пределах исследованного участка. Поэтому протяжённость зоны влияния получается даже меньше, чем для Си.

Анализ изменения содержания Hg в воде даёт следующую картину. На входе в рукав Болда концентрация Hg высока (0,003 мкг/л, или 3 ПДК). Такой она остаётся в Кривой Болде, а в середине Прямой Болды она возрастает до 0,034 мкг/л, а затем в месте слияния снижается до 0,023 мкг/л, сохраняясь на этом уровне на расстоянии 12 км. Ещё через 6 км концентрация Hg становится равной 0,001 мкг/л, т.е. 1 ПДК. Так что и по этому показателю влияние г. Астрахани распространяется на расстояние не более 20 км.

Если судить по углеводородам, их содержание максимально (почти 3 ПДК) на входе в рукав Болда (т.е. на выходе из Волги); затем оно немного снижается с небольшими колебаниями, а в месте слияния становится равным 0,1 мг/л (2 ПДК). К следующему створу через 12 км концентрация вновь возрастает в 1,4 раза, что уже никак не связано с действием городских стоков. Таким образом, получается, что по НУ зона влияния существенно меньше приведённых выше значений. Следует отметить, что результаты наших исследований совпадают с оценкой зоны влияния г. Астрахани (15–20 км), полученной в работе [Лычагина, Касимов, Лычагин, 1998].

Термогидродинамическая модель водохранилища

При моделировании кислородного режима водоёмов первостепенное значение имеют гидродинамические и гидрофизические факторы (Бреховских, 1988). Поэтому в современных моделях используются, в частности, полные неупрощённые уравнения тепло-массо-

переноса и гидродинамики с последующей их пространственно-временной дискретизацией и параметризацией процессов подсеточных масштабов. В данном случае задача состояла в построении термогидродинамической модели, отражающей формирование и развитие температурной стратификации в водоёме и проверке её способности моделировать развитие аноксидной зоны в летний период.

Программный комплекс был разработан в двухмерной по вертикали постановке (Перекальский, Кременецкая, 2007).

Используется нестационарная система уравнений гидродинамики и массопереноса, усреднённых по ширине водоёма. В уравнениях массопереноса в качестве искомых скалярных функций являются температура, концентрация кислорода. В качестве факторов, влияющих на решение задачи, рассматриваются известные натурные суточные изменения скорости и направления ветра, изменение температуры и влажности воздуха, взаимодействие с атмосферой, влияние фотосинтеза, аэрации, биохимического окисления, скорости потребления кислорода донными отложениями. Гидродинамические характеристики потока (компоненты скорости) рассчитываются с учётом термохалинных полей в водоёме, морфологии русла, изменения уровня свободной поверхности.

Уравнение для горизонтального импульса представлено в виде:

$$\begin{aligned} & \partial(Bu)/\partial t + \partial(Bu^2)/\partial x + \partial(Buw)/\partial z = \\ & = -gB\partial(P/\rho_0)/\partial x + x(B(Du/x + \tau)) + z(B(Au/z)) - \alpha u |u| |B/z|, \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение неразрывности:

$$\partial/\partial x(Bu\rho) + \partial/\partial z(Bw\rho) = 0 \quad (5)$$

Уравнение баланса температуры T :

$$\begin{aligned} & \partial(BT)/\partial t + \partial/\partial x(BuT) + \partial/\partial z(BwT) = \\ & = \partial/\partial x(BD_x T/\partial x) + \partial/\partial z(BA_z T/\partial z) + (1-\beta)I_0 \exp(-\eta z)/\delta z, \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение баланса кислорода F :

$$\partial(BF)/\partial t + \partial/\partial x(BuF) + \partial/\partial z(BwF) = \partial/\partial x(BD_x \partial F/\partial x) + \partial/\partial z(BA_z \partial F/\partial z) - SF. \quad (7)$$

Подробное описание постановки задачи изложено в работе Перекальский, Кременецкая, 2007.

Одной из задач программного комплекса являлось адекватное натурным наблюдениям получение возникновения, развития и разрушение термоклина под воздействием динамики течения, ветра и

теплового потока. Для оценки содержания взвесей в воде Можайского водохранилища в модели был разработан блок изменения концентраций взвешенного вещества в толще воды, учитывающий образование взвеси в результате продуцирования фитопланктона, взмучивания донных отложений и уменьшение концентрации взвеси в результате её оседания.

Для анализа влияния погодных условий на формирование аноксидной зоны были проведены расчёты для разных температурных условий: слабого прогрева (T воздуха от 8 до 22°C.), среднего (T воздуха от 11 до 32°C) и сильного (T воздуха 15–40°C).

Расчёты показали, что при слабой и средней стратификации (при максимальном градиенте до 5°C/м, и среднем вертикальном градиенте до 0,8 град/м) наилучшие условия по кислороду складываются при слабоевтрофных продукционно-деструкционных процессах. При сильной стратификации при T поверхности воды >25°C наибольшее среднее содержание O_2 отмечаются при мезотрофных условиях.

При слабой интенсивности продукционно-деструкционных (П-Д) процессов (мезотрофные условия) объём аноксидной зоны независимо от степени стратификации не превышает 6% объёма водохранилища. При средней интенсивности П-Д процессов доля аноксидной зоны достигает 20% объёма водохранилища лишь при сильной стратификации ($(dT/dz)_{cp} > 1^\circ C/m$). Высокая интенсивность П-Д процессов приводит к довольно быстрому росту аноксидной зоны. Даже при слабой стратификации водной толщи доля аноксидной зоны уже к 9-му дню счета составляет 15%. А при сильной стратификации доля аноксидной зоны за 12 дней достигает 40% объёма водохранилища.

Сопоставление скоростей формирования аноксидной зоны, оценённых по натурным наблюдениям и рассчитанных по модели, в зависимости от степени стратификации свидетельствуют об адекватности модельных расчётов.

Используя полученные скорости роста аноксидной зоны можно рассчитать максимально возможные объёмы аноксидной зоны за период летней температурной стратификации.

Для верификации модели были использованы данные гидролого-гидрохимических съемок и рейдовых наблюдений, проведённых на Можайском водохранилище летом 1996 г.

Массоперенос на границе «вода – донные отложения»

Проблема массопереноса между водой и донными отложениями (ДО) всегда актуальна, поскольку этот процесс играет важную роль в формировании качества воды. Это особенно важно, если в донных отложениях накапливается большое количество токсичных ЗВ (тяжёлые металлы, нефтяные углеводороды и др.), которые могут переходить в водную толщу. В частности, вынос тяжёлых металлов (ТМ) из ДО может осуществляться биотическим и абиотическим путями. К последним могут быть отнесены диффузия растворённых фракций и твёрдых частиц, десорбция и комплексообразование, происходящие при определённых физикохимических условиях.

Существенное влияние на скорость выноса ТМ оказывает состав ДО, при этом важным агентом выноса является поровый раствор, поскольку он обладает большей подвижностью по сравнению с твёрдой фазой. Поровые воды играют роль аккумулятора и носителя микроэлементов в процессе обмена ЗВ между водой и ДО, причём скорость диффузии определяется разностью концентраций ТМ в ДО водной среде. Именно величина градиента концентраций используется при грубой оценке потоков вещества из ДО на основе закона Фика.

Такие расчёты были выполнены при проведении научно-исследовательских работ на Иваньковском водохранилище в 1990-е гг. (Иваньковское водохранилище, 2000). В ходе этих исследований был собран большой материал по содержанию ТМ в воде и ДО, причём детально изучалось распределение ТМ по высоте отобранных колонок грунта. В качестве примера можно привести результаты расчёта для выноса меди. На основании измеренных величин градиента её концентрации в поровой воде поверхностного слоя и величин пористости и коэффициента диффузии было установлено, что в столб воды может переходить $0,45 \text{ мг/м}^3 \cdot \text{сут}$. Это означает, что при наблюдаемом содержании меди в воде около 5 мг/м^3 масса поступающего ежесуточно ЗВ достигала примерно 10% от полной величины, т.е. опасность вторичного загрязнения была вполне реальной.

Далее был рассмотрен вопрос о том, как изменится диффузионный поток меди при снижении её содержания в ДО. Здесь для моделирования использовалась двухмерная система уравнений Навье-Стокса и массопереноса, искомыми переменными в которых были функции тока, вихря и концентрации. Поскольку поровая вода предполагалась неподвижной, задача динамики решалась только в области течения над грунтом с соответствующими граничными условиями на входе и выходе из области решения, на свободной поверхности и на дне. В граничных условиях для уравнения массопереноса использовалось фоновое значение концентрации меди в потоке на входе в область решения и экспериментальные данные по распределению концентрации меди в поровой воде грунта Ивановского водохранилища.

Расчёт проводился при двух типах начального распределения концентрации меди по толщине ДО – равномерного и параболического (оба типа наблюдались в натуральных исследованиях). Далее рассчитывались величины диффузионного потока за годовые периоды и удельное количество вещества, поступающего в водоём. Как показали расчёты, уже в течение 1-го года наблюдается резкое уменьшение содержания меди в поровой воде (в 8 раз при параболическом и в 3 раза при равномерном начальном распределении), а к концу 5-го года происходит практически полное очищение поровой воды от меди (по сравнению с фоновым её содержанием в воде). Соответственно, в течение этого периода изменялся и удельный поток меди из ДО: его величина резко снижалась в первые два года (с 8,5 до 2,0 мг/м³год для равномерного начального распределения и с 3,4 до 0,4 мг/м³год для параболического распределения). Далее темп падения замедлялся, а величина удельного потока в период от 2 до 4 лет была сопоставима с полученной при расчёте по закону Фика.

Следует отметить, что хотя при расчёте не учитывались некоторые стороны процесса (в частности, переход меди из твёрдой фазы в раствор) снижение концентрации меди в поровой воде за указанный период достаточно хорошо отражает результаты натуральных исследований на Ивановском водохранилище в 1990-е гг.

Учёт процессов, происходящих в ДО (сорбция–десорбция) и некоторых характеристик грунта, был осуществлён в работах (Бреховских, Волкова, Перекальский, 2009); Бреховских, Волкова, Перекаль-

ский, 2010) с использованием описанного выше программного комплекса.

Уравнения массопереноса и диффузии записаны относительно концентрации ТМ (меди) в воде, поровой воде и твёрдой фазе ДО (сорбента). Гидродинамические характеристики потока (компоненты скорости) рассчитывались с учётом морфологии русла и изменения уровня свободной поверхности. Поскольку поровая вода предполагалась неподвижной, задача динамики решалась только в области течения над дном.

При относительно низких концентрациях ТМ (как это имело место в нашем для рукавов дельты р.Волги) для описания равновесных концентраций и задания граничных условий в системе «вода-твёрдая фаза» используется изотерма Генри в виде $C_T = \Gamma \times C_{ж}$, где C_T и $C_{ж}$ – концентрации ТМ на твёрдой частице и в поровом растворе, соответственно, а Γ – коэффициент распределения или постоянная изотермы Генри. Значения этого параметра колеблются в очень широком диапазоне. Так, для меди, сорбированной на частицах супеси, величина Γ изменяется в диапазоне от 240 до 1100 мг/л, а в озёрных илах она достигает 2000 мг/л (Венецианов, Лепихин, 2002). Практически такое же значение было получено в наших исследованиях для мелкодисперсных песчаных илов в дельте Волги (Бреховских, Катунин, Островская и др. 1999; Бреховских, Волкова, Перекальский, 1999).

С использованием рассчитанного поля скоростей течения из уравнения массопереноса определяли концентрацию меди во всей расчётной области, включая поровую воду (метод сквозного счёта). С помощью данной модели был проведен расчёт изменения концентрации меди при значениях параметров, соответствующих реальным условиям для частиц сорбента размером 40 мкм. Начальное значение постоянной Генри принималось равным 2000 мг/л.

Как показали расчёты, при равновесном состоянии системы «сорбент – поровая вода» поступление металла из поровой воды незначительно. При нарушении этого состояния, которое в нашем случае моделировалось через уменьшение величины Γ (до 1000 мг/л), начинается выход металла в придонный слой воды. Эта ситуация соответствует процессу закисления и десорбции меди, в результате чего в течение первых двух дней происходит рост её концентрации в поровой воде в 1,5 раза (от 5,0 до 7,8 мг/м³). В последующие дни кон-

центрация меди в поровой воде снижается. Приблизительно через 8 дней устанавливается новое равновесие, при этом отмечается рост концентрации меди в придонном слое воды (в 1,3 раза). Следует отметить, что увеличение размера частиц (и, соответственно, увеличение пористости) приводит к снижению выхода металла из сорбента в поровый раствор. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению его потока в придонный слой воды.

Процессы массообмена между водой и ДО играют важную роль и в крупных водных объектах, таких как Каспийское море. Тяжёлые металлы, поступающие в Северный Каспий со стоком Волги, переносятся далее в составе взвешенных веществ в Средний и накапливаются в ДО. Здесь концентрации таких металлов, как Cu, Zn, Mn и Ni существенно возрастают. То, что ДО могут вносить существенный вклад в содержание ТМ в водных массах Среднего Каспия, подтверждается данными о распределении Mn в 1994–95 гг: в водных массах Каспийского моря и поровых водах ДО, отобранных в глубинных областях Среднего и Южного Каспия (Брезгунов, Ферронский, 2004, 2006). Содержание Mn в водных массах Среднего и Южного Каспия в этот период значительно превышает его содержание в Северном, при этом максимальные концентрации Mn наблюдаются в глубинных водах Среднего Каспия. Такое поведение Mn находит своё объяснение при рассмотрении распределения этого элемента в поровых водах из колонок осадочных отложений, отобранных в 1994 г. в глубоководных частях Среднего и Южного Каспия (Брезгунов, Ферронский, 2010; Брезгунов, 2014).

Концентрации Mn в поровых водах среднекаспийских колонок значительно превышают соответствующие величины южно-каспийских. Особенно велико содержание Mn в поровых водах колонки, отобранной в северо-западной части Среднего Каспия у основания континентального склона. Здесь концентрации Mn более чем на два порядка превышают соответствующие значения в свободной воде моря и на порядок больше, чем в поровых водах Южного Каспия. Примечательной особенностью вертикального распределения Mn в поровых водах этой колонки является резкое уменьшение его концентрации в самом верхнем 20-см слое. Такое поведение Mn наряду со значимым увеличением его содержания в глубинных водах Среднего Каспия по сравнению с Южным и Северным (рис. 4) явилось

основанием для вывода о том, что донные отложения в районе континентального склона Среднего Каспия являются источником вторичного загрязнения водных масс Каспийского моря этим тяжёлым металлом (Брезгунов и др., 2012; Брезгунов, 2014)...

Сопоставление средних и максимальных концентраций тяжёлых металлов в донных отложениях четырёх полигонов Каспийского моря, позволило сделать вывод, что уровень загрязнения донных отложений глубинных областей Среднего и Южного Каспия существенно превышает соответствующий уровень транзитных зон, через которые происходит вынос антропогенных загрязняющих веществ с водосборных территорий Брезгунов, 2016).

Наиболее опасными с точки зрения вторичного загрязнения водных масс моря следует считать донные отложения в областях свала глубин, прилегающих к транзитным зонам, где максимально содержание тяжёлых металлов и наиболее вероятны изменения окислительно-восстановительных условий в придонном слое.

Процессы массообмена на границе «вода–донные отложения» могут значительно усиливаться за счёт биологических факторов. Речь идёт о так называемом «биоперемешивании», которое обозначает комбинированное воздействие биоты на твёрдую фазу и поровую воду вблизи поверхности раздела. (Бреховских, Казмирук, Вишневецкая, 2008). Главными участниками этого процесса являются макробеспозвоночные животные (олигохеты, полихеты, хирономиды, ракообразные и др.). Бентосные организмы могут существенно влиять на биогеохимические процессы в ДО. Создание сети прорытых ходов-каналов и ирригационная деятельность некоторых организмов способствует усилению обмена растворёнными веществами между водой и ДО, а также влияют на баланс между аэробными и анаэробными процессами в ДО.

Стенки прорытых ходов являются участками повышенной бактериальной активности, где возникают градиенты концентраций. Прокачивание воды по каналам в сочетании с переработкой частиц грунта приводит к увеличению интенсивности кругооборота растворённых веществ в ДО. К настоящему времени накоплен большой фактический материал по влиянию организмов зообентоса на обменные процессы между ДО и водной толщей, т.е. на интенсивность потоков веществ через границу раздела. Основным способом

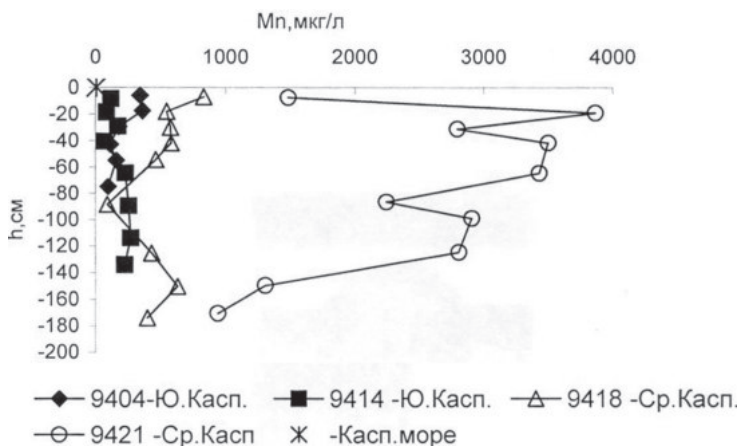


Рис. 4. Содержание Mn в поровых водах колонок донных отложений, отобранных в глубоководных областях Среднего и Южного Каспия
 1 – контроль (без олигохет); 2, 3 – численность олигохет 10^2 и 10^4 экз./ m^2 соответственно при температуре $25^{\circ}C$; 4 – численность олигохет 10^4 экз./ m^2 при температуре $10^{\circ}C$

исследования роли биоты в массообмене является эксперимент, причём очень важна методика его проведения (Бреховских, Вишневская, Власова и др. 1990).

Влияние донного населения на обменные процессы в первую очередь связано с изменением физико-химических свойств донных осадков, что определяется образом жизни отдельных групп животных и касается как консервативных элементов, так и редокс-активных металлов, органических и биогенных веществ и др. Адвективный перенос поровой или надилловой воды через границу раздела потенциально является самым главным способом воздействия макробентоса на баланс вещества. Так, во многих работах отмечалось увеличение потоков различных веществ до 10–15 раз по сравнению с потоком, рассчитанным по закону молекулярной диффузии. Вынос материала на поверхность при биоперемешивании имеет важное значение с точки зрения вторичного загрязнения, поскольку это означает, что любое захороненное в ДО токсическое вещество может со временем вновь перейти в воду. Здесь надо учитывать два основных механизма: 1) перемешивание верхнего слоя отложений за счёт деятельности макробентоса и 2) проникновение придонной воды в грунт через систему прорытых организмами ходов с последующим диффузионным обменом через их стенки.

Влияние макробентоса на величину коэффициента переноса растворённого вещества в ДО было показано на основе численного решения обратной задачи диффузии (Бреховских, Габитов, Романов, 1991). За экспериментальную основу были взяты данные по содержанию трития в поровой воде ДО Верхневолжского водохранилища. Колонки грунта, отобранные с помощью трубки ГОИН, разделялись на фрагменты длиной по 20 см, из которых затем с помощью центрифуги выделяли поровую воду. После фильтрования проб воды в них определяли концентрацию трития на жидкостно-сцинтилляционном спектрометре. Уравнение диффузии решалось, исходя из известной функции распределения концентрации трития в воде водохранилища за 1950–85 гг. и скорости осадконакопления при соответствующих начальных и граничных условиях. Расчёты и эксперимент показали, что величина коэффициента массопереноса может превышать молекулярный коэффициент диффузии в 3–6 раз, что можно объяснить только эффектом биоперемешивания.

Тритий в качестве метки при исследовании роли макробентоса в переносе растворённых веществ из ДО был использован в лабораторных экспериментах с олигохетами, которые, как известно, являются доминирующими организмами в загрязнённых водных объектах (Бреховских, Вишневская, Власова и др., 1990). Эти организмы формируют в грунте густую сеть каналов, причём около 95% этих каналов находятся в верхнем слое толщиной примерно 15–16 см. Эксперименты проводились с двумя типами речного грунта – серым илом и песчанистым илом, помещёнными в прямоугольные стеклянные кюветы. Развитие сети каналов при одинаковой плотности организмов ($5 \cdot 10^4$ экз/м²) фиксировали с помощью фотосъёмки через определённые промежутки времени. Общая длина каналов в 1 см³ ила составила 8 см, а в песчанистом иле – 19 см. Далее грунт подвергался соответствующей обработке и подготовке для опытов по двум схемам: одна была предназначена для определения величины коэффициента диффузии в грунте, а другая – для определения потока трития из ДО в воду.

Детальное описание экспериментов и расчётной схемы (для первого варианта) дано в работе (Бреховских, Вишневская, Власова и др., 1990). На основании определённого экспериментального распределения трития по высоте керна грунта рассчитывались значения коэф-

фициента диффузии, удовлетворяющие этому распределению. Результаты расчёта показали, что в грунте с олигохетами этот коэффициент увеличивался почти в 2 раза для ила и в 1,5 раза для песчанистого ила.

Опыты по измерению потока трития из грунта показали, что по истечении сравнительно небольшого времени, которое требуется олигохетам для освоения территории, поток трития в сосудах с червями становится примерно в 1,9 раза больше, чем в контрольных (поток рассчитывается по приращению концентрации трития в надиловой воде). Сравнение полученных нами результатов с данными других исследователей показывает на достаточно хорошее совпадение [например, в работе (Роббинс, 1981) установлено, что коэффициент диффузии увеличивался в 3 раза в присутствии олигохет]. Поскольку в наших экспериментах использовалось вещество, которое не вступает в реакции и с точки зрения диффузии ведёт себя как обычная вода, можно считать оценку потока вещества из ДО вполне достоверной.

Оценка интенсивности переноса растворённого вещества при наличии каналов в грунте была выполнена также с помощью коэффициента ирригации, который учитывает, помимо биопереноса в вертикальном направлении, молекулярную диффузию вещества через стенки каналов (Бреховских, Вишневская, Власова и др. 1990). Для расчёта этого коэффициента, имеющего размерность $[см^{-2}]$, использовались экспериментальные графики распределения трития по высоте грунта. В результате получим следующие значения: $V=0,24 см^{-2}$ для ила и $0,35 см^{-2}$ для песчанистого ила. Для сравнения отметим, что коэффициент ирригации в верхнем слое морского грунта, рассчитанный на основе данных по распределению сульфатов и радона (Christensen et al., 1984), изменялся в диапазоне от 0,13 до 0,41 $см^{-2}$.

Скорость массопереноса на границе раздела вода–грунт можно оценить, исходя из гипотезы о быстром (по сравнению с молекулярно-диффузионным) перемешиванием вещества под воздействием макробентоса. В этом случае уравнение массообмена выглядит так же, как известное уравнение газообмена (McCaffrey et al., 1980). Из решения уравнения находится константа скорости K , а скорость массопереноса определяется из соотношения $K_s=Kh$, где h – толщина слоя воды над грунтом. В данном случае величину K_s можно рассматри-

вать как скорость биопротачивания, т.е. как объём жидкости, переносимой в единицу времени на единицу площади поверхности грунта. Расчёты, выполненные на основании наших экспериментов с тритием, дали следующие результаты: $K_s=0,32$ и $0,56$ см/сут соответственно для грунта контрольного и с олигохетами. Здесь интересно отметить совпадение наших данных с данными экспериментов с радиоизотопаминатрия (McCaffrey et al., 1980): константа скорости (коэффициент переноса) изменялась в диапазоне $0,04-0,11$ сут⁻¹, а скорость биопротачивания составила примерно $0,7$ см/сут.

Влияние макробентоса на размыв донных отложений

Роль макробентоса не ограничивается увеличением интенсивности обмена растворёнными веществами между донными отложениями и водой. Не менее важным представляется тот факт, что в результате жизнедеятельности бентосных организмов существенно трансформируются и физико-механические свойства грунта. Изменяются объёмные характеристики и структура грунта (пористость, компактность, сцепление частиц), а также шероховатость, и следовательно, величина касательных напряжений. В целом же биологические эффекты весьма разнообразны и зависят от многих факторов, в частности от состава грунта, видового состава и количества организмов, а также времени года. Очевидно, что вследствие всех этих трансформаций должна измениться и критическая скорость потока, при которой начинается перемещение частиц грунта и увеличение концентрации взвешенных веществ. Таким образом, в присутствии роющих организмов мы практически наблюдаем переход от связанного грунта, имеющего хорошее сцепление, к несвязному, легко размываемому.

Начиная с 1970-х гг. проводилось много экспериментальных исследований в этом направлении, в основном на морских грунтах. Использовались гидравлические лотки различных конструкций, с разными грунтами и видами животных, вплоть до моллюсков.

Для оценки влияния пресноводных представителей макробентоса на размыв донных отложений нами была выполнена серия лабораторных экспериментов (Бреховских, Вишневецкая, Дебольский и др. 1988; Brekhovskikh et al., 1991). Эксперименты проводились с двумя группами бентосных организмов – олигохетами, в составе которых преобладали тубифициды (*Tubifex tubifex*), и личинками хирономид, среди

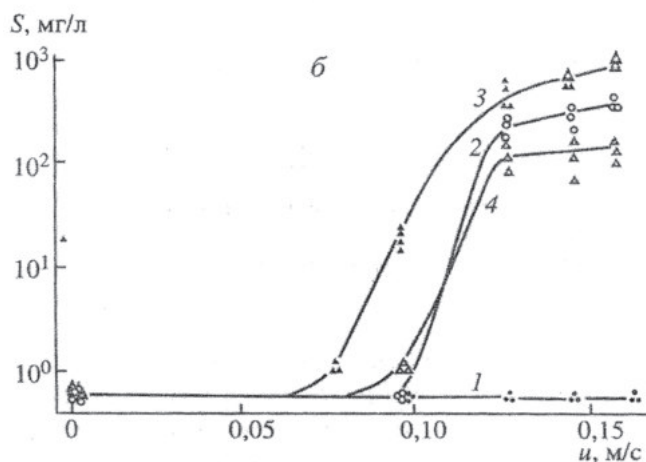
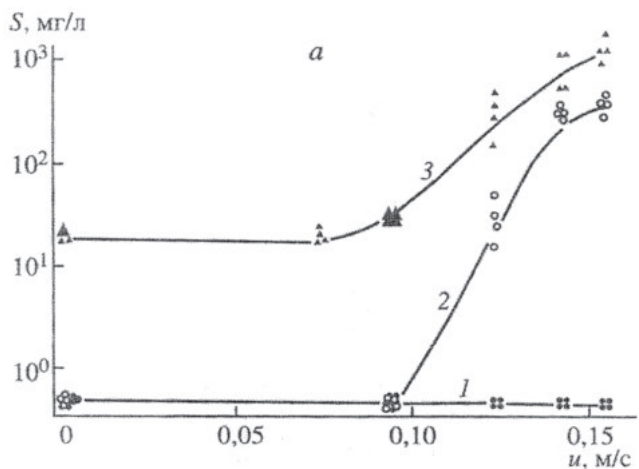


Рис. 5. Зависимость концентрации взвешенных веществ в потоке от скорости течения, численности организмов бентоса и температуры для ила (а) и илистого песка (б)

которых по биомассе доминировал мотыль (*Chironomus plumosus*). Опыты по размыву грунта проводились в кольцевых каналах, выполненных из оргстекла (детали подготовки и проведения опытов изложены в указанных выше работах). В качестве грунта использовали серый речной ил и илистый песок; максимальная плотность посадки олигохет в опытах была близка к их естественной численности в евтроф-

ном водоёме. В ходе экспериментов измеряли содержание взвешенных веществ в воде над грунтом при различных скоростях течения.

Результаты опытов с олигохетами в илистом песке представлены на рис. 5, из которого видно, что в их присутствии содержание взвеси в потоке начинает резко возрастать по достижении определённой скорости течения. Очевидно, также, что плотность посадки и температура воды играют существенную роль: понижение температуры на 15°C при одинаковой исходной плотности привело к уменьшению в 4–5 раз содержания взвешенных веществ в потоке.

Опыты с хирономидами также продемонстрировали их влияние на размыв грунта, но здесь имелись свои особенности. Дело в том, что в отличие от олигохет личинки хирономид не создавали сети каналов в грунте, а строили на его поверхности трубки-домики, высота которых достигала 0,5–1,0 см. Расчёты, выполненные по методике (Мирцхулава, 1967), показали, что в нашем случае неразмывающая донная скорость была равна 0,07 м/с, а размывающая – 0,1 м/с, что достаточно хорошо совпадает с экспериментом.

Роль бентоса можно оценить также через изменение касательных напряжений на поверхности грунта. Эти напряжения могут быть рассчитаны по обычной формуле $\tau = \rho i_*^2$, где ρ – плотность воды, i_* – динамическая скорость, которая определяется через среднюю скорость потока. Используя значения скоростей, наблюдаемых в наших экспериментах (от 0,05 до 0,25 м/с), и сопоставляя их с графиками изменения мутности, получили, что в контрольном грунте критическое максимальное напряжение ϕ_c составило не менее 0,17 Н/м², а при наличии олигохет оно снизилось до 0,02–0,03 Н/м² (Brekhovskikh et al., 1991). Эти цифры хорошо согласуются с данными других исследователей, например (Terwindt, 1977). Нужно заметить, что в 1970-х гг. и позже проблеме влияния макробентоса на структуру донных отложений и их физико-механические свойства уделялось очень большое внимание, что выразилось в соответствующем количестве публикаций.

Увеличению размыва илистых ДО может способствовать ещё один биологический фактор – обрастание мелких частиц микроорганизмами (Бреховских, Золотарева, 1985; Brekhovskikh et al., 1991). Наличие этих организмов, среди которых наиболее распространены нитчатые бактерии и простейшие (в основном сидячие инфузории),

уменьшает фактическую плотность образовавшегося комплекса и увеличивает эквивалентный диаметр. Это сказывается на величине гидравлической крупности частиц и на критическом значении влекущей силы, что должно отразиться на транспорте взвешенных наносов.

Микроскопический анализ поверхностного слоя донных отложений различного типа показал, что на частицах размером 5–100 мкм наиболее часто встречаются нитчатые бактерии и инфузории (Бреховских, Золотарева, 1985; Brekhovskikh et al., 1991). При этом доля частиц, на которых обитали одни нитчатые бактерии, составляла от 37 до 83%, а доля частиц, на которых обитают нитчатые бактерии и простейшие – от 29 до 45%.

Проведённые расчёты показали, что обрастание частиц заметно сказывается на величине их гидравлической крупности. При наличии 2–5 инфузорий этот показатель для частиц размером 30 мкм уменьшается в 2 раза. Если же на частице еще имеются нитчатые бактерии, гидравлическая крупность уменьшается в 1,5 раза даже для частиц размером 50 мкм. Расчёты критического значения влекущей силы для частиц песка размером 10 мкм, находящихся на поверхности грунта, показали, что оно может снижаться в 10 раз при обрастании инфузориями. Для частиц размером 50 мкм этот эффект заметно слабее – уменьшение всего в 2 раза.

Таким образом, можно утверждать, что эффект обрастания частиц может заметно сказываться на транспорте взвешенных наносов в реальных водоёмах, особенно в периоды массового развития простейших организмов (май–июнь, август–сентябрь). Количество же бактерий в грунте всегда достаточно велико, (до 1–2 млрд и более на 1 г грунта в летний период).

ЛИТЕРАТУРА

1. Snodgrass W.J. Reaeration and vertical diffusion of lake oxygen // *Environ. Eng.* Vol. 109, №6, 1983. P.1419–1429.
2. Бреховских В.Ф., Юшманова О.О. Моделирование кислородного режима водоемов в зимний период // *Инж. экология.* №5, 2002. С. 15–22.
3. Бреховских В.Ф., Вольпян Г.В. Моделирование кислородного режима р. Сухоны с учетом антропогенного воздействия // *Водные ресурсы.* №4, 1991. С. 198–201
4. Brekhovskikh V.F., Volpian G.V. Northern river: BOD-DO model / *Proc. Of The Northern hydrology. Symp., Saskatoon, Canada, 1990.* P. 532–536.

5. Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука. 1988. 168 с.
6. Бреховских В.Ф., Перекальский В.М. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в приливном устье Северной Двины // Метеорология и гидрология. №12, 2002. С. 86–93.
7. Бреховских В.Ф., Перекальский В.М. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в Северной Двине // Водные ресурсы. Т 27, №5. 2000. С. 574–578
8. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Колесниченко Н.Н. Проблемы качества поверхностных вод в бассейне Северной Двины. М.: Наука, 2003. 233 с.
9. Brekhovskikh V.F., Debol'skaya E.I., Debol'skii V.K., Mordasov M.A. A study into The processes of pollution spreading in tidal mouths of Northern rivers // Water Resources. Т. 24, №5. 1997. С. 490–494
10. Бреховских В.Ф., Перекальский В.М. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в приливном устье Северной Двины // Метеорология и гидрология. №12, 2002. С. 86–93.
11. Перекальский В.М., Абрамов Н.Н. Математическая модель распространения загрязняющих веществ в водном объекте // Вода: химия и экология. №4, 2012. С. 21–25
12. Перекальский В.М., Абрамов Н.Н., Авандеева О.П. Моделирование динамики течения и массопереноса в речных системах // Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике. Сб. научных трудов. Новочеркасск: ЮРГТН (НПИ), 2012. С. 300–305.
13. Проблемы качества вод Нижней Волги и Северного Каспия. М.: Типография Россельхозакадемии. 2013. 300 с.
14. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Перекальский В.М. Методические подходы к оценке зоны влияния крупных промышленных центров на качество воды в реке. Сб. научных трудов. Т. 1.: Всероссийская научная конференция «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» Петрозаводск, 2015. С. 256–262.
15. Лычагина Н.Ю., Касимов Н.С., Лычагин М.Ю. Биогеохимия макрофитов дельты Волги. (Геоэкология Прикаспия. Вып.4). М.: Географический факультет МГУ, 1998. 84 с.
16. Перекальский В.М., Кременецкая Е.Р. Математическое моделирование термогидродинамического и кислородного режимов водоема // Метеорология и гидрология. №6, 2007. С. 60–72.
17. Ивановское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344с.
18. Brekhovskikh V.F., Perekal'skii V.M., Katunin D.N., Ostrovskaya E.A., Popova O.V Heavy metal transportation and accumulation processes in the Lower Volga river // Water Resources. Т. 26, №4, 1999. С. 400–410.
19. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Перекальский В.М. К проблеме вторичного загрязнения водных объектов // Инженерная экология. №5, 1999. С. 18–23.
20. Брезгунов В.С., Ферронский В.И. Закономерности пространственного распределения ряда макро- и микроэлементов в вводных массах Каспийского моря. // Водные ресурсы. Т. 33, №5, 2006. С. 630–636.

21. Брезгунов В.С., Ферронский В.И. Макро- и микроэлементы в поровых водах глубинных областей Южного и Среднего Каспия // Водные ресурсы. Т. 37, №6, 2010. С. 700–708.

22. Брезгунов В.С., Бреховских В.Ф., Монахов С.К., Волкова З.В. О возможном влиянии Среднего Каспия на качество воды в Северном Каспии // Вода: химия и экология. №8, 2012. С. 16–21.

23. Брезгунов В.С. Содержание Mn и P в поровых водах Среднего и Южного Каспия в связи с оценкой геохимического состояния Каспийского моря // Вода: химия и экология. №7, 2014. С. 24–28.

24. Брезгунов В.С. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях Каспийского моря // Вода: химия и экология. №6, 2016. С. 78–82.

25. Бреховских В.Ф., Казмирук В.Д., Вишневецкая Г.Н. Биота в процессах массопереноса в водных объектах. Российская академия наук, Ин-т водных проблем. М.: Наука. 2008. 315 с.

26. Brekhovskikh V.F., Vishnevskaya G.N., Vlasova L.S., Mordasov M.A., Romanov V.V Effect of macrobentos on mass transfer in bottom sediments // Water Resources. Т. 17, №1, 1990. С. 83–88.

27. Бреховских В.Ф., Габитов И.Р., Романов В.В. Моделирование процессов массопереноса в донных отложениях // Водные ресурсы. №6, 1991. С. 30–36.

28. Роббинс Дж.А. Некоторые аспекты взаимодействия между бентосом и осадками в Северо-американских Великих озерах и воздействие на них токсикантов // Теоретические вопросы водной токсикологии. М.: Наука, 1981. С. 131–147.

29. Christensen J.P., Devol A.H., Smethie W.M. Biological enhancement of solute exchange between sediments and bottom water on the Washington continental shelf // Continent.Shelf. Res. Vol. 3, №1, 1984. P. 9–23.

30. McCaffrey R.J., Myers A.C., Davey E. et all. The relation between pore-water chemistry and benthic fluxes of nutrients and manganese in Narragansett Bay, Rhode Island // Limnol and Oceanogr. Vol. 25, 1980. P. 31–44.

31. Бреховских В.Ф., Вишневецкая Г.Н., Дебольский В.К. и др. Влияние бентоса на размыв донных отложений // Водные ресурсы. №3, 1988. С. 103–109.

32. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967. 179 с.

33. Terwindt J.H. Deposition, transportation and erosion of mud // Interaction between sediments and fresh / Ed. By H.L. Golterman. The Hague: Dr. Junk, 1977. P. 19–24.

34. Бреховских В.Ф., Золотарева Н.С. К оценке влияния биологических факторов на транспорт взвешенных наносов // Водные ресурсы. №6, 1985. С. 81–83.

Кинетический изотопный эффект как следствие динамики химических и биологических процессов: образование метана и его аэробное и анаэробное окисление

Работа осуществлена при поддержке Российского Научного Фонда
(проект №17-17-01204)

В.А. Вавилин

Динамика фракционирования стабильных изотопов является следствием динамики химических и биологических процессов, а фактор фракционирования δ , определяемый отношением логарифмов скоростей изменения концентраций «лёгкого» и «тяжёлого» субстратов, не зависит от типа кинетики. Исследованные процессы включали образование метана (изотопы углерода) и его аэробное и анаэробное окисление (изотопы углерода, водорода и серы). Эти процессы протекают как в водной толще, так и в почве и донных отложениях, а поступающий в атмосферу метан влияет на общий температурный баланс в биосфере. Математическое моделирование показало, что динамика перераспределения стабильных изотопов в ходе исследованных химико-биологических процессов позволяет уточнить метаболический путь превращения субстрата и определить соответствующие кинетические параметры.

В изотопных исследованиях обычно рассматривают два основных типа изотопных эффектов – термодинамические и кинетические [2, 3]. Кинетический изотопный эффект заключается в изменении скорости химической реакции при замене в молекуле реагирующего вещества какого-либо атома его изотопом. Поскольку в веществе «тяжёлого» изотопа много меньше, чем «лёгкого», отношение изотопов обычно выражается [7] через установленные международные стандарты в промилях (‰):

$$\delta[\text{‰}] = 10^3 \left(\frac{R}{R_{std}} - 1 \right) \quad (1)$$

где R и R_{std} соотношения изотопов в образце и стандарте.

Уравнение Релея [23], изначально предложенное для описания фракционирования при диффузии смеси газов, применяется и для вычисления фракционирования стабильных изотопов:

$$R_t/R_0 = (S_t/S_0)^{1/(\alpha-1)} \quad (2)$$

где R_0 и R_t , S_0 и S_t – отношение изотопов в субстрате и сами концентрации субстратов в начале реакции и в момент t , соответственно; α – коэффициент фракционирования изотопов между субстратом и продуктом в закрытой и полностью перемешиваемой системе. Величина α определяется по наклону прямой линии [20], полученной в двойных логарифмических координатах, следующих из уравнения (2). Уравнения Релея (2) традиционно выводятся, допуская справедливость реакции 1-го порядка по концентрации субстрата с «лёгким» и «тяжёлым» изотопом. При этом коэффициент фракционирования изотопов определяется как $\alpha = k_{light}/k_{heavy}$, т.е. отношением констант скоростей реакции 1-го порядка для субстрата с «лёгким» и «тяжёлым» изотопом. Реакция для субстрата с «лёгким» изотопом идёт несколько быстрее, чем реакция с «тяжёлым» изотопом.

В ходе реакции величина α с хорошей точностью может считаться постоянной, что привело к общепринятому мнению о распространённости реакций 1-го порядка в изотопных превращениях. Допуская, что концентрация субстрата с «лёгким» изотопом много больше концентрации субстрата с «тяжёлым» изотопом, динамика субстрата с более «тяжёлым» изотопом может быть выражена через динамику общего субстрата с «тяжёлым» и «лёгким» изотопом:

$$\frac{dS^h}{dt} = -\frac{S^h}{S} \frac{1}{\alpha} \frac{dS}{dt}, \quad (3)$$

где S^h/S является фракцией тяжелого изотопа в субстрате $S = S^1 + S^h \approx S^1$ (l подразумевает «лёгкий» субстрат); α – коэффициент фракционирования изотопов. Количественное описание хода химической реакции во времени в зависимости от концентраций реагирующих веществ изучает формальная химическая кинетика, тогда как теория абсолютных скоростей реакции позволяет рассчитывать скорости реакций, исходя непосредственно из свойств реагирующих молекул. В микробиологических исследованиях наибольшую известность получила модель Моно, описывающая зависимость скорости реакции от концентрации субстрата и биомассы [1].

Уравнение Релея, широко цитируемое в литературе, фактически не описывает динамику процесса. Однако, уравнение Релея справедливо для любого типа кинетики субстрата [28]. Лишь немногие публикации рассматривают фракционирование стабильных изотопов, происходящее в результате изменений в динамической системе

(например, [18, 24, 26]). В нашей работе делается вывод, что динамика фракционирования стабильных изотопов является следствием динамики химических и биологических процессов. Перераспределение стабильных изотопов позволяет уточнить метаболический путь утилизации субстрата и определить соответствующие кинетические параметры.

Основы математического описания динамики перераспределения изотопов в ходе химических и биологических процессов

При математическом описании динамики более тяжёлых стабильных изотопов, содержащихся в субстрате, продукте и биомассе, можно выделить следующие этапы:

(1) составление корректных стехиометрических химических уравнений, основанных на балансе биофильных химических элементов (Е), таких как углерод С, водород Н, кислород О, азот N и сера S:

$$aE_{\text{Субстрат}} = bE_{\text{Биомасса}} + cE_{\text{Продукт}} \quad (4)$$

где a , b и c – стехиометрические коэффициенты;

(2) запись динамических уравнений для концентраций субстрата, продукта и биомассы, не учитывая их изотопный состав и опираясь на общий материальный баланс:

$$\frac{dS}{dt} = -ac, \quad \frac{dB}{dt} = +bc, \quad \frac{dP}{dt} = +cs, \quad (5)$$

где c – скорость процесса (часто в виде зависимости Моно), описывающая уменьшение и увеличение концентраций субстрата, продукта и биомассы; a , b , c – константы;

(3) запись динамических уравнений для концентраций более тяжёлых стабильных изотопов, содержащихся в субстрате, продукте и биомассе, опираясь на баланс тяжёлых изотопов:

$$\begin{aligned} \frac{d^h S}{dt} &= -\frac{^h S}{S} \frac{1}{\alpha} \frac{dS}{dt} \\ \frac{d^h B}{dt} &= +\frac{^h S}{S} \frac{1}{\alpha} \frac{dB}{dt} \\ \frac{d^h P}{dt} &= +\frac{^h S}{S} \frac{1}{\alpha} \frac{dP}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

где индекс h обозначает более тяжёлый изотоп, α – фактор фракционирования стабильного изотопа.

В качестве субстрата и продукта реакции могут быть газы, такие как метан и диоксид углерода. Скорость массообмена (TR) между растворённой и газовой формами метана и диоксида углерода пропорциональна разности концентрации растворённого газа S и его равновесной концентрации S^* , умноженной на коэффициент массообмена K_L :

$$TR=K_L(S^*-S) \quad (7)$$

В свою очередь, равновесная концентрация S^* растворенного газа есть произведение парциального давления газа и его растворимости.

Для проточного реактора уравнения должны быть дополнены непрерывно поступающими на вход и выходящими концентрациями общего и тяжёлого субстрата, продукта и биомассы [1]:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{T} (Q_{\text{вход}} - Q_{\text{выход}}), \quad (8)$$

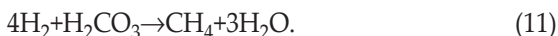
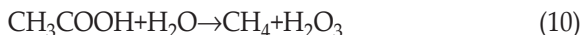
где Q – концентрации общего и тяжёлого субстрата, продукта и биомассы, T – время пребывания жидкости в реакторе. При этом концентрация более тяжёлого входящего субстрата, продукта и биомассы много меньше, чем концентрация общего субстрата, продукта и биомассы.

Образование метана и фракционирование изотопов углерода

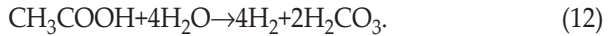
Метан является вторым наиболее важным парниковым газом, концентрация которого значительно увеличивается в результате деятельности человека, способствуя глобальному потеплению [15, 32]. В процессе образования метана из целлюлозного материала ($C_6H_{10}O_5$)_n принимают участие несколько типов микроорганизмов, осуществляя деполимеризацию (гидролиз), ферментативный кислотогенез, ацетогенез и метаногенез. Основным продуктом ферментативного разложения целлюлозы являются моносахариды, которые в дальнейшем трансформируются в летучие жирные кислоты (ЛЖК), такие как ацетат, водород (H_2) и диоксид углерода (CO_2):



Основными субстратами для метаногенных микроорганизмов являются ацетат и водород/диоксид углерода, соответственно [34]:



Традиционно считается [6], что вклад ацетокластического метаногенеза составляет около 70% общей продукции метана. Однако относительный вклад различных ацетокластических и гидрогенотрофных метаногенных микроорганизмов в образование метана может определяться факторами окружающей среды, типом анаэробного реактора и режимом проведения процесса, а также составом микроорганизмов в инокуляте [8]. Так, при термофильных условиях и в присутствии ингибиторов, таких как аммоний и летучие жирные кислоты (ЛЖК), доминирующим механизмом метанообразования является процесс, при котором ацетат предварительно окисляется до H_2 и H_2CO_3 :



Эта реакция, осуществляемая ацетат-окисляющими микроорганизмами, происходит синтрофно с водородотрофными метаногенами, трансформирующими H_2 и H_2CO_3 в CH_4 .

Поскольку фракционирование изотопов углерода в результате ацетокластического и водородотрофного метаногенеза резко отличаются, для определения доминирующего пути образования метана часто используется следующее выражение для кажущейся величина коэффициента фракционирования b_c [31]:

$$\alpha_c^{app} = \frac{\delta^{13}C_{CO_2} + 1000}{\delta^{13}C_{CH_4} + 1000}. \quad (13)$$

Стехиометрические уравнения реакций (9) – (12) и соответствующие динамические уравнения содержатся в работе [30].

Не учитывая изотопный состав, образование метана из целлюлозы описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dCel}{dt} &= -k_h Cel \\ \frac{dAc}{dt} &= 2k_h Cel - c_{AcOx} - c_{Sar} - c_{Sae} \\ \frac{dH_2}{dt} &= 4k_h Cel + (4 - 10Y_{AcOx})c_{AcOx} - (4 - 10Y_{H_2/CO_2})c_{meth}^{H_2/CO_2} \quad (14) \\ \frac{dCO_2}{dt} &= 2k_h Cel + (2 - 5Y_{AcOx})c_{AcOx} + (1 - 2,5Y_{Sar})c_{Sar} + \\ &\quad + (1 - 2,5Y_{Sae})c_{Sae} - c_{meth}^{H_2/CO_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dCH_4}{dt} &= (1-2,5Y_{Sar})c_{Sar} + (1-2,5Y_{Sae})c_{Sae} + (1-5Y_{H_2/CO_2})c_{meth}^{H_2/CO_2} \\ \frac{dB_{AcOx}}{dt} &= Y_{AcOx}c_{AcOx} - k_{dAcOx}B_{AcOx} \\ \frac{dB_{Sar}}{dt} &= Y_{Sar}c_{Sae} - k_{dSar}B_{Sar} \\ \frac{dB_{Sae}}{dt} &= Y_{Sae}c_{Sae} - k_{dSae}B_{Sae} \\ \frac{dB_{H_2-meth}}{dt} &= Y_{H_2/CO_2}c_{meth}^{H_2/CO_2} - k_{dH_2-meth}B_{H_2-meth} \end{aligned} \quad (14)$$

Динамика изменений ^{13}C в субстрате в ходе превращения целлюлозы в метан и диоксид углерода, промежуточных продуктах и биомассе описывалась следующей системой дифференциальных уравнений [30]:

$$\begin{aligned} \frac{d^{13}C_{Cel}}{dt} &= -\frac{^{13}C_{Cel}}{Cel} \cdot \frac{1}{\alpha_{Cel}} k_h Cel \\ \frac{d^{13}C_{Ac}}{dt} &= -\frac{^{13}C_{Ac}}{Ac} \left(\frac{1}{\alpha_{AcOx}} c_{AcOx} + \frac{1}{\alpha_{Sar}} c_{Sar} + \frac{1}{\alpha_{Sae}} c_{Sae} \right) + 2 \frac{^{13}C_{Cel}}{Cel} \frac{1}{\alpha_{Cel}} k_h Cel \\ \frac{d^{13}C_{CO_2}}{dt} &= 2 \frac{^{13}C_{Cel}}{Cel} \frac{1}{\alpha_{Cel}} k_h Cel + \frac{^{13}C_{Ac}}{Ac} \times \\ &\times \left(\frac{1}{\alpha_{Sar}} (1-2,5Y_{Sar})c_{Sar} + \frac{1}{\alpha_{Sae}} (1-2,5Y_{Sae})c_{Sae} + (2-5Y_{AcOx}) \frac{1}{\alpha_{AcOx}} c_{AcOx} \right) - \\ &- \frac{^{13}CO_2}{CO_2} \frac{1}{\alpha_{H_2/CO_2}} c_{meth}^{H_2/CO_2} \\ \frac{d^{13}C_{CH_4}}{dt} &= \frac{^{13}C_{Ac}}{Ac} \left(\frac{1}{\alpha_{Sar}} (1-2,5Y_{Sar})c_{Sar} + \frac{1}{\alpha_{Sae}} (1-2,5Y_{Sae})c_{Sae} \right) + \\ &+ \frac{^{13}CO_2}{CO_2} \frac{1}{\alpha_{H_2/CO_2}} (1-5Y_{H_2/CO_2})c_{meth}^{H_2/CO_2} \\ \frac{d^{13}C_{B_{Sar}}}{dt} &= \frac{^{13}C_{Ac}}{Ac} \frac{1}{\alpha_{Sar}} Y_{Sar}c_{Sar} - k_{dSar}^{13}C_{B_{Sar}} \\ \frac{d^{13}C_{B_{Sae}}}{dt} &= \frac{^{13}C_{Ac}}{Ac} \frac{1}{\alpha_{Sae}} Y_{Sae}c_{Sae} - k_{dSae}^{13}C_{B_{Sae}} \\ \frac{d^{13}C_{B_{AcOx}}}{dt} &= \frac{^{13}C_{Ac}}{Ac} \frac{1}{\alpha_{AcOx}} Y_{AcOx}c_{AcOx} - k_{dAcOx}^{13}C_{B_{AcOx}} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{d^{13C}B_{H_2/CO_2}}{dt} = \frac{^{13C}CO_2}{CO_2} \frac{1}{\alpha_{H_2/CO_2}} Y_{H_2/CO_2} C_{H_2/CO_2}^{meth} - k_d H_2/CO_2 \quad (15)$$

$$- k_d H_2/CO_2 \quad ^{13C}B_{H_2/CO_2}$$

где $^{13C}B_{Sae}$, $^{13C}B_{AcOx}$ и $^{13C}B_{H_2-meth}$ – концентрации «болеетяжёлой» биомассы ацетатокластических метаногенов *Methanosarcina*, *Methanosaeta*, ацетат-окисляющих бактерий и водородотрофных метаногенов, соответственно, содержащих 13C ; $\alpha_{C_{cel}}$, $\alpha_{S_{ar}}$, $\alpha_{S_{ae}}$, α_{AcOx} , α_{H_2/O_2} – соответствующие факторы изотопного фракционирования по углероду в процессе гидролиза и кислотогенеза, ацетокластического метаногенеза, осуществляемого ацетокластическими метаногенами *Methanosarcina* и *Methanosaeta* окисления ацетата и водородотрофного метаногенеза.

Численные расчёты выполнялись с помощью пакета МАТЛАБ [21], с использованием функции *ode15s* и *ode23s*. На рис. 1 показана динамика образования метана из целлюлозы. При высокой начальной концентрации ацетат-окисляющих бактерий, имеющих более высо-

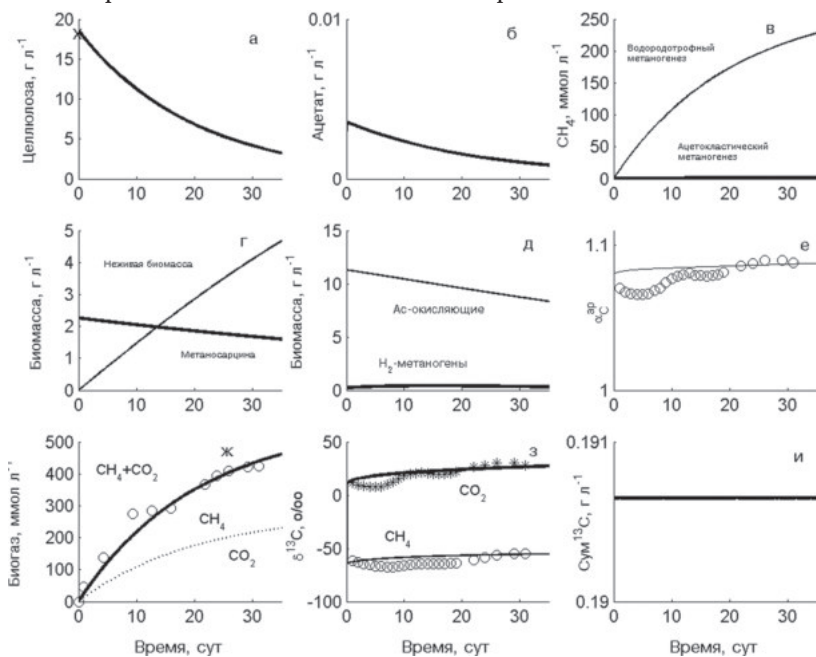


Рис. 1. Превращение целлюлозы в метан при высокой концентрации биомассы ацетат-окисляющих бактерий. Экспериментальные данные [17], кривые: математическая модель [30]

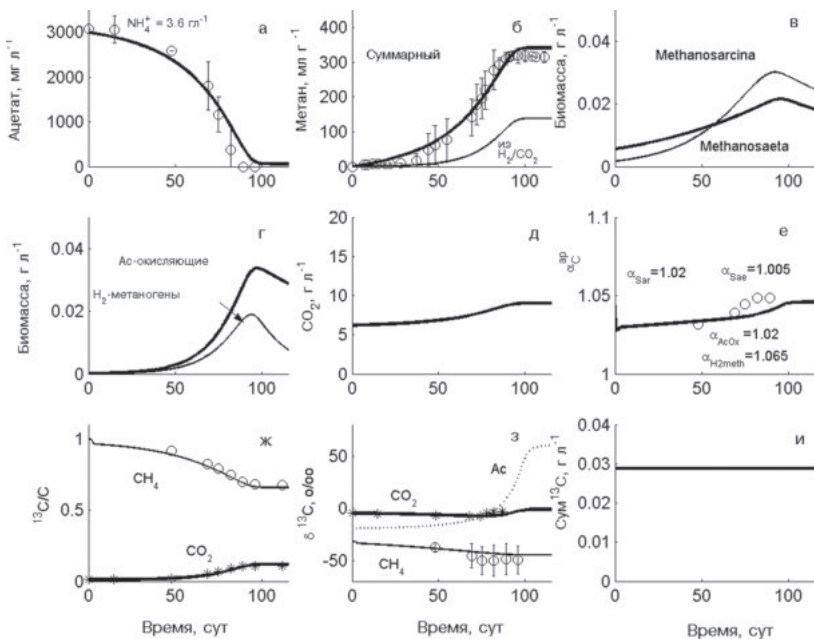


Рис. 2. Превращение меченого и природного ацетата в метан при высокой концентрации аммония 3,6г/л в ходе 3-х параллельных экспериментов. Экспериментальные данные [11], кривые: математическая модель [30]

кую скорость роста биомассы, чем *Methanosarcina*, модель показала доминирование водородотрофного метаногенеза над ацетокластическим метаногенезом (рис. 1в). Кажущийся изотопный коэффициент фракционирования α_C^{app} был высоким и достиг величины 1,085 (рис. 1е), что подтверждает доминирование синтрофного окисления ацетата, спаренного с водородотрофным метаногенезом. Повидимому, это происходит вследствие высокой концентрации аммония или летучих жирных кислот. Модель показала, что при низкой концентрации биомассы ацетат-окисляющих бактерий отношение ацетокластического и водородотрофного метаногенеза составляет традиционные 70 и 30% [6].

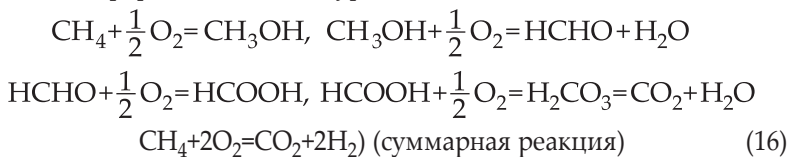
При относительно высокой концентрации аммония в системе принимают активное участие четыре группы микроорганизмов: *Methanosarcinaceae*, *Methanosarcinaceae*, водородотрофные метаногены и ацетат-окисляющие бактерии, находящиеся в исходной затравке микроорганизмов. Поскольку при этом ацетокластические метаногены

имеют значительно меньшую скорость роста, в системе развиваются ацетат-окисляющие бактерии и водородотрофные метаногены, несмотря на их малую начальную концентрацию (рис. 2г). Метан образуется как из ацетата, так и из угольной кислоты. В итоге меченым метан становится лишь на 75% (рис. 2ж). Ацетокластические метаногены обладают невысоким коэффициентом фракционирования стабильных изотопов углерода $\alpha_c=1,02$ (Methanosarcinaceae) и $\alpha_c=1,005$ (Methanosaetaceae). В процессе образования метана из ацетата идёт увеличение кажущегося коэффициента фракционирования α_c от 1,028 до 1,047 (рис. 2е), поскольку водородотрофные метаногены обладают большим коэффициентом фракционирования стабильных изотопов углерода $\alpha_c=1,065$.

Таким образом, анализируя динамику фракционирования стабильных изотопов, можно сделать выводы о химических реакциях, динамике микробной экосистемы и вкладе различных микроорганизмов в образование метана.

Аэробное окисление метана и фракционирование изотопов углерода и водорода

Количественное описание микробного окисления метана является существенным для оценки цикла метана в биосфере и понимания роли метана в глобальном потеплении [15]. Процесс аэробного окисления метана разными метан-окисляющими микроорганизмами или метанотрофами [5] может протекать по двум биохимическим путям: сериновому и рибулезно-монофосфатному (RuMP). По сериновому метаболизму скорость роста биомассы зависит от конечного продукта окисления метана H_2CO_3 . Согласно химическому пути, предложенному Темплтоном и др. [25], в процессе окисления метана идёт образование промежуточных продуктов, а именно метанола, формальдегида и муравьиной кислоты:



Эти реакции описывают рибулезно-монофосфатный путь окисления метана (RuMP).

Аэробное окисление метана сопровождается сильным фракционированием стабильных изотопов углерода и водорода, приводя к обогащению ^{13}C и ^2H в остающемся метане. Следуя работе [29], в основе нелинейной математической модели, описывающей физический процесс растворения метана, динамику роста микроорганизмов и потребления метана лежит баланс общего углерода в системе. Для рибулёзо-монофосфатного пути базовая модель рассматривалась в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\text{CH}_4^{\text{G}}}{dt} &= -TR_{\text{CH}_4} \\ \frac{d\text{CH}_4}{dt} &= +TR_{\text{CH}_4} \\ \frac{d\text{HCHO}}{dt} &= v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} - c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} \\ \frac{dB}{dt} &= Y c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} \\ \frac{d\text{O}_2^{\text{G}}}{dt} &= -TR_{\text{O}_2} \\ \frac{d\text{O}_2}{dt} &= -v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} - c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + TR_{\text{O}_2} \\ \frac{d\text{CO}_2^{\text{G}}}{dt} &= -TR_{\text{O}_2} \\ \frac{d\text{H}_2\text{CO}_3}{dt} &= (1-Y) c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + TR_{\text{CO}_2} \end{aligned} \quad (17)$$

где B – концентрация биомассы микроорганизмов, CH_4 , O_2 , HCHO , H_2CO_3 – концентрации метана, кислорода, формальдегида и угольной кислоты, соответственно; v_m – максимальная удельная скорость ферментативного окисления растворенного метана; ρ_m – максимальная удельная скорость потребления формальдегида; cr – минимальная концентрация растворенного метана, ниже которой не происходит рост биомассы; K_{CH_4} , K_{HCHO} , $K_{\text{H}_2\text{CO}_3}$, K_{O_2} – соответствующие константы полу-насыщения для концентраций метана, формальдегида, карбонной кислоты и кислорода, соответственно; Y – экономический коэффициент (коэффициент трансформации субстрата в биомассу);

индекс G означает газообразную форму метана, кислорода и углекислого газа. Предполагалось, что концентрации метанола и муравьиной кислоты, являясь быстрыми переменными, подстраивались под текущие значения концентрации растворённого метана. К основной системе (17) были добавлены соответствующие уравнения для тяжёлых изотопов ^{13}C и $^2\text{H(D)}$:

$$\begin{aligned} \frac{d^{13}\text{CH}_4^G}{dt} &= -\frac{1}{\alpha_C} \frac{^{13}\text{CH}_4^G}{\text{CH}_4^G} TR_{\text{CH}_4} \\ \frac{d^{13}\text{CH}_4}{dt} &= \frac{1}{\alpha_C} \left(-\frac{^{13}\text{CH}_4}{\text{CH}_4^G} v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + \frac{^{13}\text{CH}_4^G}{\text{CH}_4^G} TR_{\text{CH}_4} \right) \\ \frac{d\text{CDH}_3^G}{dt} &= -\frac{1}{\alpha_H} \frac{\text{CDH}_3^G}{\text{CH}_4^G} TR_{\text{CH}_4} \\ \frac{d\text{CDH}_3}{dt} &= \frac{1}{\alpha_H} \times \\ &\times \left(-\frac{\text{CDH}_3}{\text{CH}_4} v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + \frac{\text{CDH}_3^G}{\text{CH}_4^G} TR_{\text{CH}_4} \right) \quad (18) \\ \frac{d^{13}\text{C}B}{dt} &= \frac{1}{\alpha_C} \frac{\text{H}^{13}\text{CHO}}{\text{HCHO}} \gamma c_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} \\ \frac{d\text{H}^{13}\text{CHO}}{dt} &= \frac{1}{\alpha_C} \frac{^{13}\text{CH}_4}{\text{CH}_4} \times \left(v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} - \right. \\ &\left. - \frac{\text{H}^{13}\text{CHO}}{\text{HCHO}} c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} \right) \\ \frac{d^{13}\text{CO}_2^G}{dt} &= -\frac{1}{\alpha_C} \frac{^{13}\text{CO}_2^G}{\text{CO}_2^G} TR_{\text{CO}_2} \\ \frac{d\text{H}_2^{13}\text{CO}_3}{dt} &= \frac{1}{\alpha_C} \frac{\text{H}^{13}\text{CHO}}{\text{HCHO}} (1 - \gamma) c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + \\ &+ \frac{1}{\alpha_C} \frac{^{13}\text{CO}_2^G}{\text{CO}_2^G} TR_{\text{CO}_2} \end{aligned}$$

где $^{13}\text{CH}_4^G$, $^{13}\text{CH}_4$, CDH_3^G , CDH_3 , H^{13}CHO , $^{13}\text{CO}_2^G$, $\text{H}_2^{13}\text{CO}_3$, $^{13}\text{C}B$ – концентрации соответствующих переменных, содержащих «тяжё-

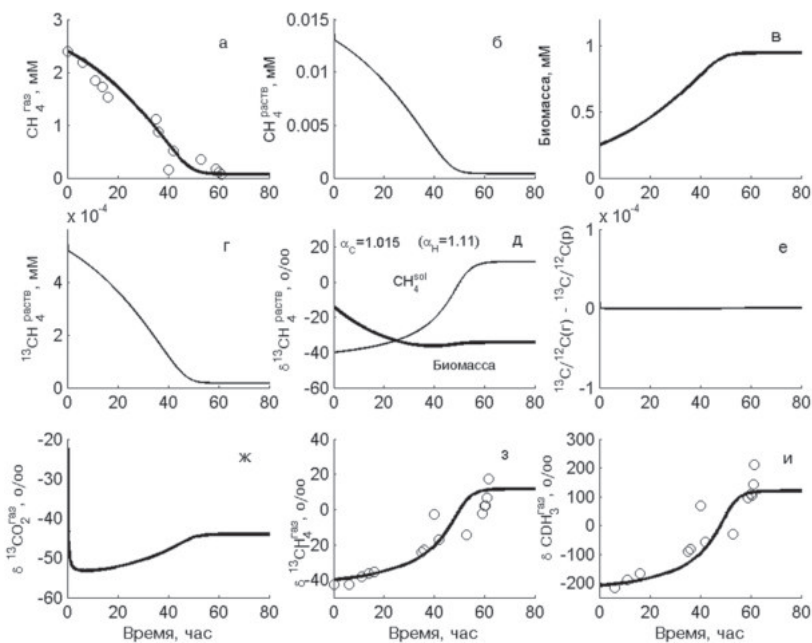


Рис. 3. Рибулезно-монофосфатный (RuMP) путь окисления метана (Methyloticaldium gracile). Символы: эксперимент [10]; кривые: математическая модель [29]

дые» изотопы ^{13}C и ^2H в газовой и растворённой формах; α_C и α_H – коэффициенты фракционирования изотопов углерода и водорода. В системе (18) сохраняется баланс углерода ^{13}C в ходе окисления метана. Для изотопов водорода оценка баланса ^2H затруднена из-за обмена с изотопами воды H_2O .

В математической модели предполагалось, что отношение изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в газовой и жидкой фазах было одинаковым. Для этого при растворении «тяжёлого» метана правая часть уравнений метана в газовой фазе умножалась на коэффициенты $1/\alpha_C$, $1/\alpha_H$, где α_C и α_H равны углеродному и водородному изотопным факторам фракционирования в ходе микробиологического окисления растворённого метана. Таким путём описывался процесс растворения «тяжёлого» метана с меньшей скоростью, чем «лёгкого» метана в соответствии скоростям его микробиологического окисления.

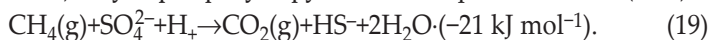
На рис. 3 представлены результаты моделирования процесса окисления метана по RuMP метаболическому пути. Предполагалась достаточно высокая начальная концентрация биомассы метанотро-

фов (рис. 3в), обеспечивающая высокую начальную скорость реакции. Дополнительно моделировался и сериновый путь окисления метана (не приводится в обзоре). В сериновом метаболизме наблюдалась задержка процесса [29], поскольку скорость роста биомассы сильно зависела от начальной концентрации биомассы и конечного продукта H_2CO_3 , являющегося в то же время вторым субстратом (допускалось, что B_0 была значительно ниже в сериновом, чем в RuMP метаболизме). Таким образом, было обнаружено, что для серинового метаболизма рост биомассы метанотрофов лимитировал скорость окисления метана.

Если не рассматривать процесс фракционирования изотопов в ходе микробиологического окисления метана, отношения изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в газовой и жидкой фазах будут сильно отличаться, что противоречит экспериментальным данным Нокса и др. [16]. Учёт фракционирования изотопов углерода в ходе микробиологического окисления метана позволяет получить одинаковые отношения изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в газовой и жидкой фазах. Кроме того, моделирование [29], как и экспериментальные данные [10] показали, что величина факторов фракционирования α_{C} и α_{H} зависит как от вида метанотрофных бактерий, так и от содержания меди в растворе, влияющей на скорость ферментативных процессов. Таким образом, фракционирование изотопов углерода и водорода происходит именно в процессе микробного окисления растворенного метана.

Анаэробное окисление метана сульфатом и фракционирование изотопов углерода, водорода и серы

Анаэробное окисление метана (АОМ) сульфатом играет ключевую роль в цикле углерода и серы в морских экосистемах. В донных отложениях морей вклад АОМ достигает 80–85% от общего окисления метана в морях [12], существенно ограничивая поступление метана в атмосферу. АОМ идет вблизи термодинамического равновесия, осуществляемый синтрофным консорциумом метанотрофных архей (ANME) и сульфат-редуцирующих *Deltaproteobacteria* (DSS):



При этом часто образуются небольшие агрегаты [4] или объёмные маты. Сравнительно недавно Милучка и др. [22] показали, что нейтральные соединения серы (S^0) образуются в процессе восстанов-

ления сульфатов. В ходе АОМ обратимость ферментативных реакций может уменьшить общую скорость процесса [14].

Холлер и др. [13] в периодическом эксперименте определили факторы фракционирования стабильных изотопов углерода и водорода в процессе АОМ, осуществляемом культурами микроорганизмов с высокой активностью окисления, взятыми из 3-х донных отложений (HydrateRidge, NEPacificAmonMudVolcano, MediterraneanSea, NWshelf, BlackSea). Проведённое нами моделирование процесса показало [27], что изотопные факторы фракционирования $\alpha_{\text{C}} \text{ и } \alpha_{\text{H}} (\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} / \delta^{12}\text{C}_{\text{CH}_4} \text{ и } \delta\text{CDH}_3 / \delta\text{CH}_4)$ были равны 1,012, 1,12 (Гидраты HydrateRidge: 12°C), 1,02, 1,2 (Вулкан AmonMud: 20°C) и 1,036, 1,34 (BlackSea: 12°C), что оказалось близким к факторам фракционирования, оценённым Холлером [13] с помощью уравнения Релея (3). Такие различные значения факторов фракционирования могут зависеть от вида биомассы и обратимости реакции так же, как и от состава промежуточного продукта.

В математической модели для описания роста обобщённой биомассы микроорганизмов B используем функцию Моно с двумя субстратами (метан и сульфат):

$$\begin{aligned} \frac{d\text{CH}_4}{dt} &= -\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \\ \frac{d\text{SO}_4^{2-}}{dt} &= -\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \\ \frac{d\text{CO}_2}{dt} &= (1-Y)\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \\ \frac{d\text{HS}^-}{dt} &= (1-Y)\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \\ \frac{dB}{dt} &= Y\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \end{aligned} \quad (20)$$

где CH_4 , SO_4^{2-} – концентрации метана и аниона сульфата; B – концентрация обобщенной биомассы, объединяющей анаэробные метанотрофные археи (ANME) и сульфат-редуцирующие (DSS) бактерии; CO_2 and SH^- – концентрации диоксида углерода и аниона сероводорода, соответственно; ρ_m – максимальная удельная скорость процесса; K_{CH_4}

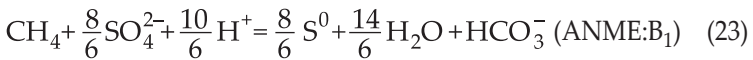
и $K_{SO_4^{2-}}$ – 2-константы полу-насыщения по концентрации метана и сульфата; Y – экономический коэффициент. Система (20) дополняется соответствующими уравнениями для тяжёлого метана:

$$\frac{d^{13}CH_4}{dt} = \frac{^{13}CH_4}{CH_4} \frac{1}{\alpha_C} \frac{dCH_4}{dt}, \quad (21)$$

$$\frac{dC^2H^1H_3}{dt} = \frac{C^2H^1H_3}{CH_4} \frac{1}{\alpha_H} \frac{dCH_4}{dt}, \quad (22)$$

где $^{13}CH_4$ и $C^2H^1H_3$ – концентрации соответствующих тяжёлых фракций метана, α_C и α_H – коэффициенты фракционирования по углероду и водороду. Динамика анаэробного окисления метана (АОМ) показана на рис. 4. Видно, что нулевой порядок изменения δCH_4 и δCDH_3 обусловлен нулевым порядком скорости АОМ.

Как было указано выше, Милучка и др. [22] показали, что нейтральные соединения серы (S^0) образуются в процессе восстановления сульфатов, а общий процесс АОМ может быть представлен синтрофными реакциями, осуществляемыми двумя группами микроорганизмов ANME и DSS. В качестве промежуточного продукта может быть ряд нейтральных соединений серы с простейшим из них S^0 . В этом случае стехиометрические реакции записываются в виде:



С учётом биомассы ANME и DSS стехиометрические реакции могут быть представлены в виде:

$$CH_4 + \frac{4 - 10Y_1}{3} SO_4^{2-} = Y_1 C_5H_4O_2 + \frac{4 - 10Y_1}{3} S^0 + \frac{2 + 4Y_1}{3} H_2O + (1 - 5Y_1) CO_2 + \frac{8 - 20Y_1}{3} OH^- \quad (25)$$

$$CH_4 + (4 - 10Y_2) S^0 + (2 - 8Y_2) H_2O = Y_2 C_5H_4O_2 + (4 - 10Y_2) H_2S + (1 - 5Y_2) CO_2 \quad (26)$$

Деснер и др. [9] провели АОМ, измеряя изотоп серы ^{34}S в точном ректоре повышенного давления с увеличенным временем пребывания биомассы из-за образования агрегатов биомассы и их осаждения. Метан находился в растворе. Для описания процесса

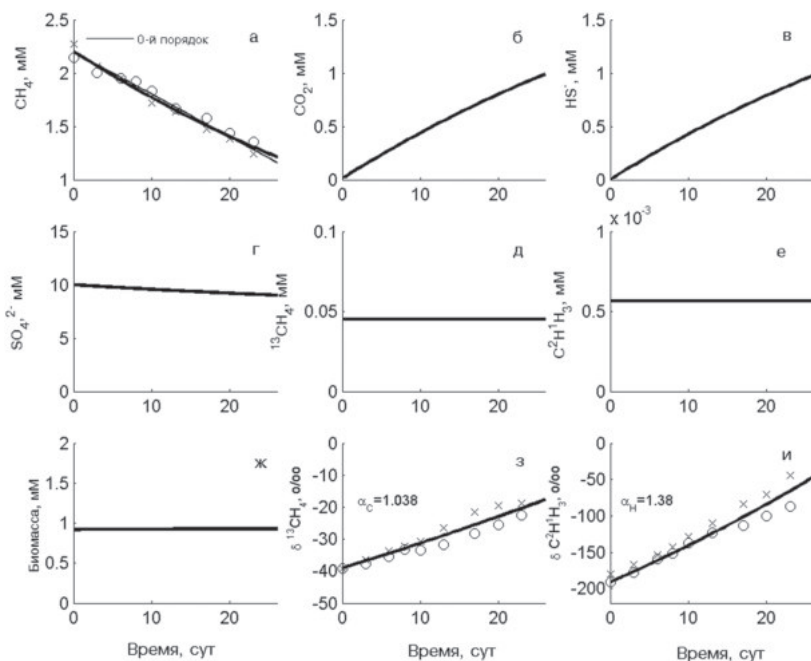


Рис. 4. Динамика анаэробного окисления метана сульфатом. Символы: периодический эксперимент [13]; кривые: математическая модель (20) с одной обобщенной биомассой [27]

введём дополнительные функции, описывающие скорость потребления метана R в ходе реакций (25) и (26):

$$R_1 = \rho_{m1} B_1 \frac{CH_4 - cr}{K_{CH_4} + CH_4 - cr} \frac{SO_4^{2-}}{K_{SO_4^{2-}} + SO_4^{2-}} \quad (27)$$

$$R_2 = \rho_{m2} B_2 \frac{CH_4 - cr}{K_{CH_4} + CH_4 - cr} \frac{S^0}{K_{S^0} + S^0} \quad (28)$$

где S^0 – концентрация нейтральной серы; B_1 и B_2 – концентрации ANME и DSS; ρ_{m1} и ρ_{m2} – максимальные удельные скорости процессов (25) и (26); K_{S^0} – константа полу-насыщения по концентрации нейтральной серы; cr – минимальная концентрация метана, ниже которой прекращается рост биомассы. Базовая математическая модель АОМ, не рассматривающая изотопные переменные, записывается в виде:

$$\begin{aligned}
\frac{d\text{CH}_4}{dt} &= -R_1 - R_2 + \frac{1}{T} (\text{CH}_4^{\text{in}} - \text{CH}_4) \\
\frac{d\text{SO}_4^{2-}}{dt} &= -\frac{4-10Y_1}{3} R_1 + \frac{1}{T} (\text{SO}_4^{2-\text{in}} - \text{SO}_4^{2-}) \\
\frac{d\text{CO}_2}{dt} &= (1-5Y_1)R_1 + (1-5Y_2)R_2 + \frac{1}{T} (\text{CO}_2^{\text{in}} - \text{CO}_2) \\
\frac{d\text{H}_2\text{S}}{dt} &= (4-10Y_2)R_2 + \frac{1}{T} (\text{H}_2\text{S}^{\text{in}} - \text{H}_2\text{S}) \\
\frac{dS^0}{dt} &= \frac{4-10Y_1}{3} R_1 - (4-10Y_2)R_2 + \frac{1}{T} (S^{0\text{in}} - S^0) \\
\frac{dB_1}{dt} &= Y_1 R_1 + \frac{1}{T} B_1^{\text{in}} - \frac{1}{T_1} B_1 \\
\frac{dB_2}{dt} &= Y_2 R_2 + \frac{1}{T} B_2^{\text{in}} - \frac{1}{T_1} B_2
\end{aligned} \tag{29}$$

где Y_1 и Y_2 – экономические коэффициенты для ANME и DSS; T и T_1 – время пребывания растворенных реагентов и биомассы в реакторе. Допускалось, что биомасса микроорганизмов слабо вымывалась из реактора, при этом $T_1 \gg T$. Индекс «in» обозначал входящую концентрацию реагента. Предполагалось, что вода и гидроксил-ион присутствуют в реакторе в избытке.

Систему (29) нужно дополнить соответствующими уравнениями для тяжёлой серы ^{34}S :

$$\begin{aligned}
\frac{d^{34}\text{SO}_4^{2-}}{dt} &= -\frac{^{34}\text{SO}_4^{2-}}{\text{SO}_4^{2-}} \frac{1}{\alpha_{\text{S-SO}_4^{2-}}} \frac{4-10Y_1}{3} R_1 + \frac{1}{T} (^{34}\text{SO}_4^{2-\text{in}} - ^{34}\text{SO}_4^{2-}) \\
\frac{d^{34}\text{S}^0}{dt} &= \frac{^{34}\text{SO}_4^{2-}}{\text{SO}_4^{2-}} \frac{1}{\alpha_{\text{S-SO}_4^{2-}}} \frac{4-10Y_1}{3} R_1 - \\
&- \frac{^{34}\text{S}^0}{S^0} \frac{1}{\alpha_{\text{S-S}^0}} (4-10Y_2)R_2 + \frac{1}{T} (^{34}\text{S}^{0\text{in}} - ^{34}\text{S}^0) \\
\frac{d\text{H}_2^{34}\text{S}}{dt} &= \frac{^{34}\text{S}^0}{S^0} \frac{1}{\alpha_{\text{S-S}^0}} (4-10Y_2)R_2 + \frac{1}{T} (\text{H}_2^{34}\text{S}^{0\text{in}} - \text{H}_2^{34}\text{S}^0)
\end{aligned} \tag{30}$$

где $^{34}\text{SO}_4^{2-}$, $^{34}\text{S}^0$ и H_2^{34}S – концентрации соответствующих тяжёлых фракций реагентов, $\alpha_{\text{S-SO}_4^{2-}}$ и $\alpha_{\text{S-S}^0}$ – коэффициенты фракционирования изотопов серы.

Динамика системы представлена на рис. 5. Из рисунка следует, что коэффициенты фракционирования начального субстрата сульфата $\alpha_{S-S_4^2-}$ и промежуточного продукта нейтральной серы α_{S-S^0} могут сильно различаться.

Выводы

Динамика фракционирования стабильных изотопов является следствием динамики химических и биологических процессов. Перераспределения стабильных изотопов позволяет уточнить метаболический путь утилизации субстрата и определить соответствующие кинетические параметры. В табл. показаны исследованные процессы и их кинетические характеристики, в том числе факторы фракционирования стабильных изотопов.

Поступление метана в атмосферу зависит как от его образования, так и его окисления. В свою очередь, аэробное и анаэробное окисление метана, идущие в водной среде, зависят не только от

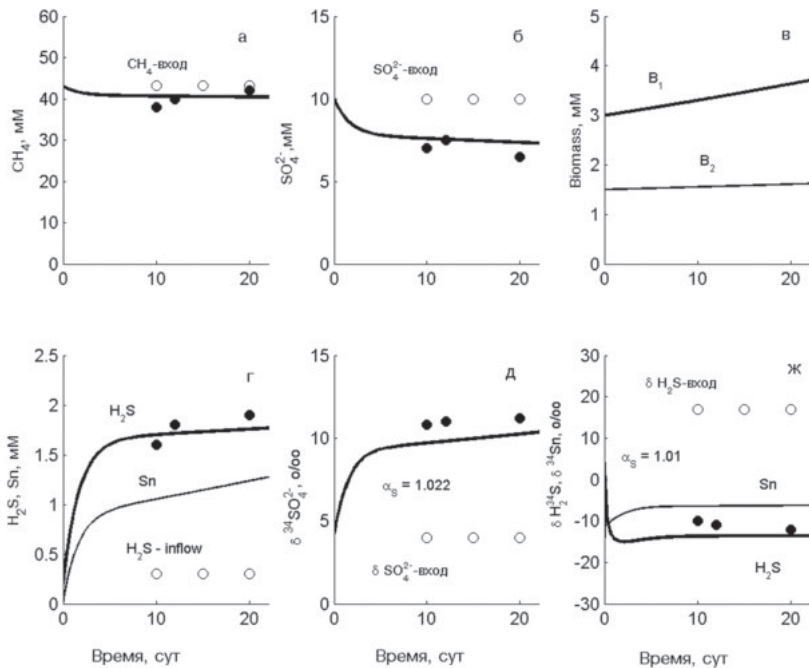


Рис. 5. Динамика анаэробного окисления метана сульфатом. Символы: проточный эксперимент [9]; кривые: математическая модель с двумя группами биомассы

Исследуемые процессы, константы скорости и фактор фракционирования стабильных изотопов.

Процесс	Стадия гидролиза и кислотогенеза, максимальная удельная скорость роста биомассы μ_m	Фактор фракционирования изотопов	Примечания
1. Метанизация целлюлозы (рис. 1)	Гидролиз – лимитирующая общую скорость стадия $k_h=0,05 \text{ сут}^{-1}$		Идет синтрофное окисление ацетата и водородотрофный метаногенез. Величина α_C^{ap} постоянна и равна 1,08
2. Метанизация ацетата при высокой концентрации аммония (рис. 2)	0,064 сут^{-1} (Sarcina) 0,026 сут^{-1} (Saeta) 0,04 сут^{-1} (Ac-окисляющие) 2 сут^{-1} (H_2 -метаногены)	$\alpha_C=1,02$ $\alpha_C=1,005$ $\alpha_C=1,02$ $\alpha_C=1,065$	Ацетокластический метаногенез замещается на водородотрофный метаногенез. Величина $\alpha_C^{ap}=1,02$ увеличивается до 1,047
3. Аэробное окисление метана по рибулезомонофосфатному пути (рис. 3)	<i>M. gracile</i> 0,10 ч^{-1} *	$\alpha_C=1,0015$ $\alpha_H=1,1$	Фракционирование изотопов идет в процессе микробного окисления растворенного метана
4. Анаэробное окисление метана сульфатом в периодическом эксперименте обобщенной биомассой (рис. 4) двумя группами микроорганизмов (рис. 5)	0,0017 сут^{-1} 0,012 сут^{-1} (ANME) 0,0045 сут^{-1} (DSS)	$\alpha_C=1,038$ $\alpha_H=1,38$ $\alpha_S=1,022$ $\alpha_S=1,01$	Высокая концентрация биомассы и сравнительно большая концентрация метана приводит к 0-му порядку реакции окисления метана от его концентрации. Промежуточным продуктом является нейтральная сера. Фактор фракционирования изотопов серы резко отличаются для ANME и DSS

самого метана, но и от других субстратов. В различные эволюционные времена их вклад сильно отличался. Динамика стабильных изотопов позволяет оценить как метаболический путь утилизации субстрата в самой клетке, так и вклад различных групп микроорганизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М., Наука, 1979.
2. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М., Наука, 1973.
3. Зякун А.М. Теоретические основы изотопной масс-спектрометрии в биологии. Пушино, Фотон-век, 2010.
4. Boetius A., Ravensschlag K., Schubert C.J., Rickert D., Widdel F., Gieseke A., Amann R., Jørgensen B.B., Witte U., Pfannkuche O. A marine microbial consortium apparently mediating oxidation of methane. *Nature*, 2000. V. 407. P. 623–626.
5. Bürgmann H. *Encyclopedia of Geobiology*. 2011. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, 575–578.
6. Conrad R. Quantification of methanogenic pathways using stable carbon isotopic signatures: a review and a proposal. *Organ. Geochem.* 2005. V. 36. P. 739–752.
7. Craig H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1957. V.12, P. 133–149.
8. Demirel B., Scherer P. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2008. V. 7. P. 173–190.
9. Deusner C., Holler T., Arnold G.L., Bernasconi S.M., Formolo M.J., Brunner B. Sulfur and oxygen isotope fractionation during sulfate reduction coupled to anaerobic oxidation of methane is dependent on methane concentration. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2014. V. 399. P. 61–73.
10. Feisthauer S., Vogt C., Modrzynski J., Szlenkier M., Krüger M., Siegert M., Richnow H.H. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2011. V. 75. P. 1173–.
11. Grossin-Debattista J. Fractionnements isotopiques ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) engendrés par la méthanogénèse: apports pour la compréhension des processus de biodégradation lors de la digestion anaérobie. Docteur thèse. 2011. Université Bordeaux-1. 346 P.
12. Hinrichs K.U., Boetius A. The anaerobic oxidation of methane: new insights in microbial ecology and biogeochemistry. In: *Ocean Margin Systems*. G. Wefer et al. (Eds.). Springer-Verlag. Berlin. 2002. P. 457–477.
13. Holler T., Wegener G., Knittel K., Boetius A., Brunner B., Kuypers M. M.M., Widdel F. (2009) Substantial $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}/\delta^{12}\text{C}_{\text{CH}_4}$ and D/H fractionation during anaerobic oxidation of methane by marine consortia enriched in vitro. *Env Microbiol Reports* 2009. V.1. P. 370–376.
14. Holler T., Wegener G., Niemann H., Deusner C., Ferdelman T.G., Boetius A., Brunner B., Widdel F. Carbon and sulfur back flux during anaerobic microbial oxidation of methane and coupled sulfate reduction. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2011. V. 108. P. E1484–E1490.
15. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L.,

Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J.-F., Langenfelds R.L., Le Quéré C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poulter B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L. P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G.R., Voulgarakis A., van Weele M., Weiss R. F., Williams J.E., Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience* 2013. V. 6. 813–823.

16. Knox M., Quay P.D., Wilbur D.J. Kinetic isotopic fractionation during air-water gas transfer of O₂, N₂, CH₄, and H₂. *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 20335–20343.

17. Laukenmann S., Polag D., Heuwinkel H., Creule M., Gronauer A., Lelieved J., Keppler F. Identification of methanogenic pathway in anaerobic digesters using stable carbon isotopes. *Eng. Life Sci.* 2010. V. 10. P. 1–6.

18. Maggi F., Riley W.J. Mathematical treatment of isotopologue and isotopomer speciation and fractionation in biochemical kinetics. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 2010. V. 74, P. 1823–1835.

19. Mahieu K., Visscher A.D., Vanrolleghem P., Cleemput O.V. Carbon and hydrogen isotope fractionation by microbial methane oxidation: Improved determination. *Waste management* 2006. V. 26. P. 389–398.

20. Mariotti A., Germon J.C., Hubert P., Kaiser P., Letolle R., Tardieux A., Tardieux P. Experimental determination of nitrogen kinetic isotope fractionation: some principles; illustration for the denitrification and nitrification processes. *Plant and Soil* 1981. V. 62, P. 413–430.

21. MathWorks Inc. The MathWorks, Inc. Natick, Massachusetts 01760 USA: www.matworks.com. (1984).

22. Milucka J., Ferdelman T.G., Polerecky L., Franzke D., Wegener G., Schmid M., Lieberwirth I., Wagner M., Widdel F., Kuypers M.M.M. Zero-valent sulphur is a key intermediate in marine methane oxidation. *Nature* 2012. V. 491. P. 541–546.

23. Rayleigh J.W.C. Theoretical consideration respecting the separation of gases by diffusion and similar processes. *Philos. Mag.* 1896. V. 42. P. 493–498.

24. Rodriguez-Escales P., van Breukelen B.M., Vidal-Gavilan G., Soler A., Folch A. Integrating modelling of biogeochemical reactions and associated isotope fractionation at batch scale: A tool to monitor enhanced biodenitrification applications. *Chem. Geology* 2014. V. 365. P. 20–29.

25. Templeton A., Chu K.H., Ivarez-Cohen L., Conrad M.E. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2006. V. 70. P. 1739–1752.

26. van Breukelen B.M., Prommer H. Beyond the Rayleigh equation: reactive transport modeling of isotope fractionation effects to improve quantification of biodegradation. *Environ. Sci. Technol.* 2008. V. 42, P. 2457–2463.

27. Vavilin V.A. Estimating changes of isotopic fractionation based on chemical reactions and microbial dynamics during anaerobic methane oxidation: apparent zero- and first-order kinetics at high and low initial methane concentrations. *Ant. Leeuwenhoek* 2013. V. 103. P. 375–383.

28. Vavilin V.A., Rytov S.V. Nitrate denitrification with nitrite or nitrous oxide as intermediate products: stoichiometry, kinetics and dynamics of stable isotope signatures. *Chemosphere* 2015. V. 134. P. 417–426.
29. Vavilin V.A., Rytov S.V., Shim N., Vogt C. Non-linear dynamics of stable carbon and hydrogen isotope signatures based on a biological kinetic model of aerobic enzymatic methane oxidation. *IEHS* 2016. V. 52, P. 185–202.
30. Vavilin V.A., Rytov S.V. Dynamic changes of apparent fractionation factor to describe transition to syntrophic acetate oxidation during cellulose and acetate methanization. *IEHS* 2017. V. 53, 135–156.
31. Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chem. Geology* 1999. V. 161. P. 291–314.
32. Wuebbles D.J., Hayhoe K. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews* 2002. V. 57. P. 177–210.
33. Zinder S.H., Koch M. Non-aceticlastic methanogenesis from acetate: acetate oxidation by thermophilic syntrophic coculture. *Arch. Microb.* 1984. V. 38. P. 263–272.
34. Zinder S.H. In: *Methanogenesis, Ecology, Physiology, Biochemistry and Genetics* (ed. J.G. Ferry), Chapman & Hall, New York, 1993.

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИИ СУШИ И ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Современное состояние и проблемы глобальной гидрологии

С.Г. Добровольский

Введение. Понятие «глобальная гидрология»

Если попытаться кратко определить понятие «глобальная гидрология», то это область науки, которая занимается изучением не только гидрологических объектов и процессов на суше в глобальном масштабе, но и всех основных компонентов мирового водного баланса и их изменениями во времени.

Прежде чем обратиться к современному состоянию и проблемам глобальной гидрологии, приведём некоторые пояснения, связанные с происхождением самого понятия «глобальная гидрология». Как известно, гидрология вначале включала в качестве объекта исследований воды во всех сферах Земли, в том числе в океанах и морях. Таким образом, изначально гидрология и была «глобальной», хотя уровень науки о воде в различных сферах во многом был рудиментарным. Со временем разделы науки, связанные с океанами и морями, стали отделяться от «гидрологии» (которая превращалась по существу в «гидрологию суши») и образовали область науки под названием «океанология». В последние десятилетия существования СССР отечественная океанология, пожалуй, развивалась более интенсивно, чем гидрология суши – и финансировалась в намного больших объёмах. Достаточно сказать, что в Москве, расположенной в сотнях и тысячах километров от морей и океанов, было четыре научно-исследовательских института, занимавшиеся океанологией – и до конца 1960-х гг. (до образования Института водных проблем РАН) ни одного гидрологического института. Аналогичные процессы имели место и в системе гидрологического образования: в крупнейшем вузе страны – Московском университете – в начале 1950-х гг. из кафедры гидрологии выделилась, в качестве самостоятельной единицы, мощная кафедра океанологии.

Вместе с тем, и после разделения наук «гидрология суши» испытывала необходимость в более широком поле деятельности – в спе-

цифическом изучении ряда процессов в океане, атмосфере и криосфере в глобальном масштабе. Причин такого интереса гидрологии к Мировому океану и глобальному климату было несколько. Основные из них видятся в следующем.

Происходящие в настоящее время гидрологические процессы на поверхности суши и в подповерхностных горизонтах тесно связаны с процессами в атмосфере, а те – с процессами в океане и в криосфере. Для понимания закономерностей изменений гидрологических характеристик (в первую очередь – важнейшей из них – величины речного стока) необходимо не просто «слепо доверяться» метеорологам и климатологам, но сознательно проследить все звенья цепи глобального гидрологического цикла.

Попытки прогнозирования состояния вод суши на отдалённую перспективу неизбежно выводят гидрологию на глобальный уровень, так как сама проблема существенно глобальна.

Наконец, изучение гидрологических процессов в отдалённом прошлом также подразумевает способность гидрологов разбираться в палео-океанических процессах и в эволюции прошлых оледенений.

К сказанному добавим, что изучение и собственно гидрологических процессов во многих случаях и по многим причинам требует глобального подхода: изучения эволюции речного стока, озёр, водохранилищ и других гидрологических объектов в глобальном масштабе.

Основные исследования в области глобальной гидрологии в последние десятилетия

Результатом и характерным признаком поворота отечественной гидрологии к глобальной тематике было появление в 1960-е – 1970-е гг., менее чем за 10 лет, трёх фундаментальнейших работ: монографии Г.П. Калинина «Проблемы глобальной гидрологии» [10], книги и атласа «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» [15] и монографии Д.Я. Ратковича «Многолетние колебания речного стока» [17]. Первая и третья из перечисленных монографий носили во многом проблемный, постановочный характер, так как были связаны с чрезвычайно дискуссионными для того времени вопросами (впрочем, значительная часть этих вопросов остаётся таковыми и в наше время). Важнейшим достижением Калинина представляется

обоснование в его труде тезиса: «До последнего времени в гидрологии преобладали преимущественно региональные исследования. Обобщение материалов по земному шару сможет дать много нового о формировании режима вод суши и вместе с тем позволит существенно развить методы гидрологических расчётов и прогнозов» ([10], с. 9). В свою очередь, Ратковичем был достигнут принципиальный результат: впервые на материале около 300 створов на реках мира было показано, что межгодовые и многолетие колебания речного стока, как правило, удовлетворительно описываются малопараметрическими стационарными стохастическими моделями, не содержащими периодических составляющих или квазициклических колебаний.

Наконец, многочисленный коллектив, работавший над монографией и атласом «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» на основе огромного, для того времени, объёма информации смог, в первом приближении, оценить средние многолетние значения составляющих глобального водообмена и величин речного стока – как в глобальном масштабе, так и для конкретных регионов. Несмотря на то что после издания указанного труда прошло более 40 лет, во многом он остаётся непревзойдённым – как по тщательности оценки, так и по качеству использованных в нём данных наблюдений.

К сказанному необходимо добавить, что существенный вклад в развитие разделов по существу «глобальной» гидрологии, её современных и палео-приложений внесли труды М.И. Будыко и И.П. Герасимова [2], М.И. Львовича [14], В.И. Ферронского и В.А. Полякова [25], Р.К. Клиге [11], Л.П. Кузнецовой (Kuznetsova, [30]), В.Е. Привальского [16], К. К. Эдельштейна [18], А.М. Догановского и В.Н. Малинина [9] и ряда других исследователей. В списке литературы указаны лишь отдельные, но показательные труды этих учёных.

Вместе с тем, важная часть вопросов, поставленных отечественными классиками глобальной гидрологии, до недавнего времени оставалась нерешённой. В конце 1960-х – в 1-й половине 1970-х гг. ещё не существовали адекватные методы идентификации стохастических моделей для описания изменений гидрологических параметров во времени и в пространстве: они постепенно внедрялись в практику научных исследований лишь с середины 1970-х гг. По этой причине правильно поставленные в работах Г.П. Калинина и Д.Я. Раткови-

ча проблемы изменений гидрологических характеристик в глобальном пространственном масштабе и в климатических масштабах времени в тот период не могли быть изучены с достаточной степенью полноты.

Дальнейшее развитие глобальной гидрологии в нашей стране и за рубежом было затруднено рядом как объективных, так и субъективных причин. Одна из них была прямо названа в труде Ю.Б. и Т.А. Виноградовых «Современные проблемы гидрологии»: «Несмотря на то, что практические проблемы регулирования вод привели к рождению гидрологии, в настоящее время они тормозят её развитие» ([3], с. 304–305). Так, вовлечение десятков научно-исследовательских институтов в 1970-е – 1980-е гг. в прикладные исследования, связанные с подготовкой бессмысленных региональных проектов «европейской» и «азиатской» перебросок речного стока в бассейны соответственно Каспийского и Аральского морей, мягко говоря, не благоприятствовало увлечению таким разделом фундаментальной науки, как глобальной гидрологией. В середине 1980-х гг. была упразднена лаборатория глобального водообмена, основанная в своё время в ИВП Г.П. Калининым. Последовавший вслед за этим «угар перестройки» и общий упадок отечественной науки вследствие её катастрофического недофинансирования также не способствовал развитию фундаментальных разделов гидрологии – вынуждая научных сотрудников гоняться за большим количеством малобюджетных и краткосрочных «грантов» (мало что дававших для науки) или решая чисто прикладные задачи по заказу министерств и ведомств. Мы уже не говорим здесь о недавнем разгроме академической науки путём фактического упразднения РАН, поставившем фундаментальные научные исследования в крайне неопределённое положение. Роковую роль играет и переход на оценку труда научных сотрудников при помощи неких «рейтингов», основанных на публикациях статей в (желательно зарубежных) журналах и почти совершенно не учитывающих монографии. Таким образом, краткое – на две странички – сообщение в журнале ценится в бесконечное число раз больше, чем крупная монография из многих сотен страниц, на подготовку которой уходят многие годы. Напомним, что именно монографии ранее были сильной стороной отечественной науки,

получившей мировую известность своими крупными теоретическими обобщениями в области гидрометеорологии.

Представляется, что и за рубежом вплоть до последнего времени целенаправленным исследованиям в области глобальной гидрологии уделялось недостаточное внимание. До 1970-х гг. работы на Западе велись примерно в том же направлении, что и в СССР и были подытожены в известной монографии А. Баумгартнера и Е. Райхеля «Мировой водный баланс» [20] – аналогичной упоминавшейся отечественной монографии [15], хотя и более скромной как по объёму, так и по кругу затронутых проблем. Однако с 1980-х гг. за рубежом научная область глобальной гидрологии, как и многие другие области наук о Земле, были буквально подняты вошедшим в моду направлением, которому было дано название «Глобальные изменения» и которое было ориентировано почти исключительно на изучение предполагаемого парникового потепления и его возможных эффектов. При этом основная роль отводилась моделям климатической системы (сокращённо МОЦАО или КМОЦ), и многие науки о Земле превратились по существу в отрасли «компьютерных наук» (Computer Science), а результаты, в какой-то мере связанные с глобальной гидрологией, появлялись зачастую в качестве лишь побочных продуктов климатических моделей – на наш взгляд, без должной увязки с данными наблюдений и, следовательно, без сколько-нибудь глубокого целенаправленного анализа. Достаточно сказать, что вплоть до недавнего времени подробный количественный анализ изменений наблюдаемого речного стока в климатических масштабах времени и в подлинно глобальном масштабе просто отсутствовал. Кстати, одна из причин такого положения дел – фактическая закрытость наиболее полного глобального электронного архива по речному стоку в г. Кобленц, Германия [27]. В этом отношении гидрологам меньше повезло, чем океанологам, климатологам, гляциологам и представителям других наук о Земле: большинство электронных архивов глобальных данных в этих областях науки полостью открыты для всеобщего пользования.

Тем не менее, несмотря на перечисленные выше трудности, в настоящее время в ИВП РАН делается попытка возродить направление глобальной гидрологии: создана одна из немногих – если не единственная в мире – лаборатория с одноименным названием

(лаборатория глобальной гидрологии), работам в этом направлении придан официальный статус, они включены в планы работ Института и РАН; выходят в свет статьи и монографии соответствующего содержания, готовятся глобальные электронные базы данных, читаются лекции для аспирантов и ведутся диссертационные исследования. Перечислим основные монографии, подготовленные сотрудниками лаборатории глобальной гидрологии в предшествующий период и служащие основой для современных и будущих исследований. Это книги: «Аномалии глобального теплообмена» [4], «Global climatic changes in water and heat transfer-accumulation processes» [23], «Stochastic climate theory» [24], «Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера»» [5], «Наводнения мира» [7], «Глобальные изменения речного стока» [6].

Основные результаты, полученные сотрудниками лаборатории в рамках основных направлений глобальной гидрологии в недавнем прошлом и в настоящий период (и ставящие новые проблемы), заключаются в следующем.

Исследования средних характеристик влагосодержания земных сред и составляющих глобального водообмена

В упомянутой выше фундаментальной монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» на основе большого объёма информации (максимального для того времени – для середины 1970-х гг.) и в результате чрезвычайно аккуратных расчётов была, в основном, выяснена картина среднего многолетнего влагосодержания основных компонентов климатической системы и средних значений основных составляющих глобального водообмена. На рис. 1 представлены оценки средних объёмов влаги, содержащейся в основных компонентах глобальной системы – почерпнутые из упомянутой монографии и дополненные нами из других источников. На этом же рисунке представлена предложенная нами новая классификация компонентов глобальной (климатической) системы, учитывающая их основное качество – размерность, влияющую на многие важные свойства потоков влаги между компонентами. Несмотря на возможные значительные ошибки в оценке величин на рис. 1 (уточнение этих оценок представляет собой одну из современных проблем глобальной гидрологии), схема отражает основное – различия в порядках представленных величин. А именно, объём воды,

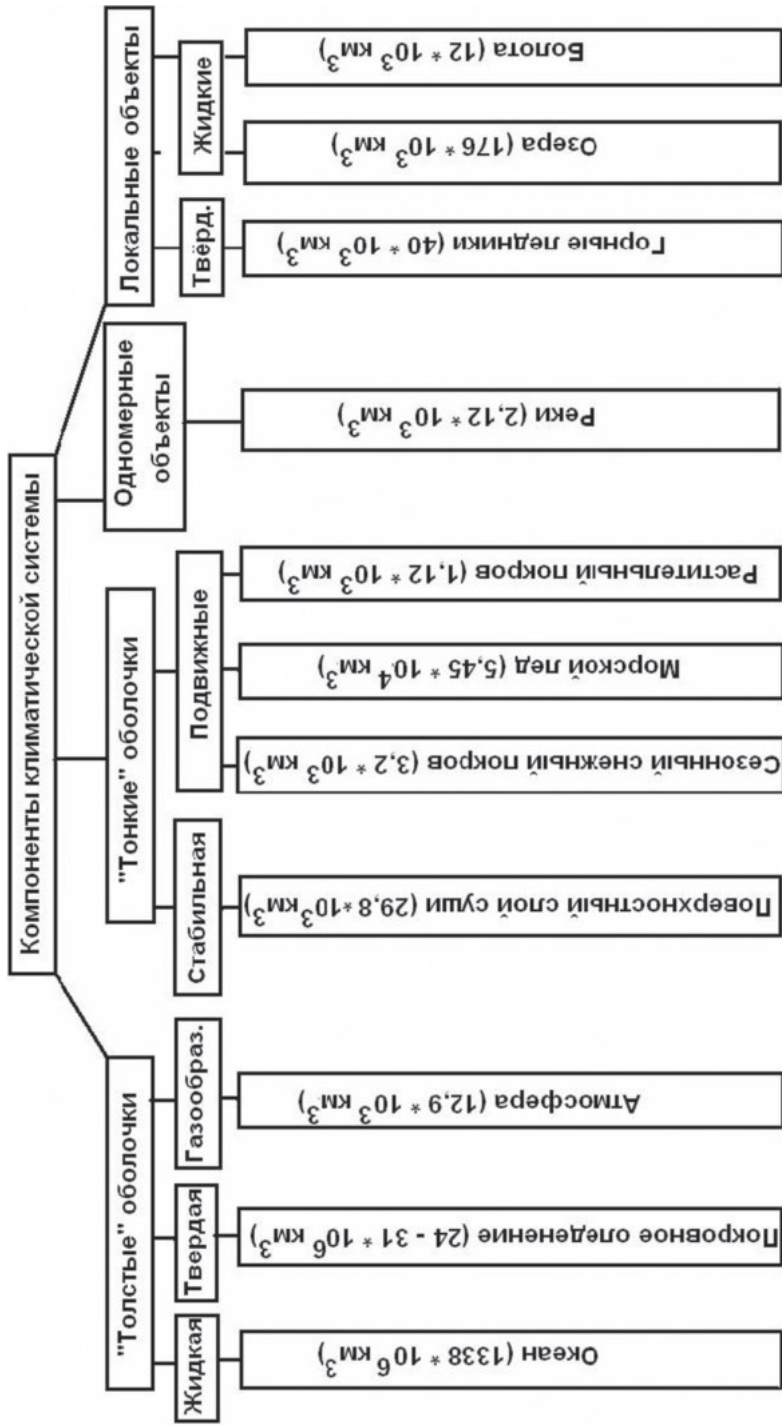


Рис. 1. Основные компоненты глобальной климатической системы и оценки объёмов воды, содержащихся в каждой из составляющих системы (по [6])

содержащейся в Мировом океане на порядки превосходит объём воды, содержащейся в других компонентах системы, за исключением покровного оледенения. Из этого обстоятельства вытекает важный вывод: потоки влаги, которыми обменивается океан с другими компонентами системы, и отклонения этих потоков от средних значений в климатическом масштабе времени – совершенно незначительны по сравнению с влагосодержанием океана. Отсюда другое важнейшее следствие: соответствующие обратные связи крайне невелики, и изменения составляющих глобального влагообмена в первом приближении не влияют на площадь поверхности океана.

Таким образом, в рассматриваемом природном механизме отсутствует так называемый реактивный эффект. Можно ожидать поэтому, что природные изменения влагосодержания океана (следовательно, и суммарного влагосодержания компонентов системы, находящихся на суше – с учётом принципа постоянства объёма влаги на Земле, обоснованного Г.П. Калининым) описываются моделью случайного блуждания – в дискретном случае моделью дискретного винеровского процесса. Добавим к этому, что по сходным причинам можно ожидать, что и естественные изменения глобальной температуры описываются аналогичной моделью.

Сложнее обстоит дело с оценками средних многолетних величин составляющих глобального водообмена. Если величины на рис. 1 могут содержать значительные ошибки, но сильно различаются по порядкам, то порядки средних величин глобальных потоков влаги сопоставимы, и ошибки оценок в данном случае чрезвычайно существенны.

Для оценки средних значений глобальных потоков влаги воспользуемся результатами реанализа, полученными в рамках выполнения проектов «20 Century» и NCEP/NCAR [19, 31], как и результатами обобщения данных прямых наблюдений в рамках проектов GPCP [26], SMAP ENCH [22]¹, и сравним их с оценками из издания [15]. В табл. 1 приведены результаты, полученные в рамках указанных проектов, осреднённые за перекрывающийся всеми ими период времени: 1979–2012 гг. Качество этих оценок будет анализироваться ниже, отметим здесь лишь тот факт, что 1979 г., как общее начало рядов оценённых

¹ Средние величины потоков влаги по данным реанализа, были получены В.П. Юшковым с использованием «масок» океана и суши.

Таблица 1

Средние величины глобальных потоков влаги, по данным издания [15] за период, предшествовавший началу 1970-х гг., и по данным современных проектов за период 1979–2012 гг. Все величины – в мм/сут.

Параметр	Мир.в.б.	20 Cen.	NCEP/ NCAR	GPCP	CMAP
Испарение с океана	3,836	3,837	3,333	–	–
Осадки над океаном	3,479	3,377	2,969	2,879	2,966
Эфф. испарение, океан	0,357	0,460	0,362	–	–
Осадки над сушей	2,192	2,395	2,290	2,174	1,919
Эвапотрансп., суша	1,329	1,609	1,836	–	–
Эфф. осадки, суша	0,863	0,786	0,456	–	–

потоков фигурирует не случайно: именно с этого года начали стабильно поступать данные спутниковых наблюдений, учитываемые в результатах реанализа и предположительно делающих эти результаты более достоверными.

Как видно из таблицы, из числа наиболее современных проектов только два («20 Century» и «NCEP/NCAR») дают оценки всех перечисленных составляющих мирового водного баланса; в рамках проектов «GPCP» и «CMAP en chanced») оценивались только осадки над сушей и океаном. Вследствие этого приведём сравнение лишь для результатов первых двух проектов – хотя читатели сами могут оценить результаты остальных двух.

Обратимся прежде всего к параметру, наиболее интересующему гидрологов – «эффективным осадкам» над сушей, являющимися по существу оценкой так называемого климатического стока – разности между осадками и эвапотранспирацией, которая и формирует речной сток. Непосредственно наблюдаемые данные по стоку, по нашим оценкам, дают для периода 1917–2004 гг. величину глобально суммированного речного стока $47 \cdot 10^3$ км³/год [6]. В издании [15], по данным до начала 1970-х гг., приводятся цифры от 45 до 47 тыс. км³/год. Оценка глобального «климатического стока» в проекте «20 Century», будучи пересчитанной в объёмы стока в год, даёт величину $43 \cdot 10^3$ км³/год – сравнительно близкую к нашим оценкам и оценкам из [15]: разница составляет от 4 до 9% и не превышает расхождений между двумя различными оценками в монографии 1974 г. В то же время, расхождение между наблюдаемыми данными по глобальному стоку

и оценкой проекта «NCAR» чрезвычайно велика и составляет от 44 до 47% (явно больше ошибок оценок наблюдаемого стока): пересчёт оценки NCAR в объёмные единицы в год даёт величину лишь $25 \cdot 10^3$ км³/год.

Что касается составляющих глобального водообмена в целом, то оценки проекта «20 Century» в большинстве случаев ближе к оценкам из [15], чем оценки «NCEP/NCAR»: кроме упомянутых выше оценок речного стока, это также оценки испарения с поверхности океана, осадков над океаном и эвапотранспирации с поверхности суши. Практическое совпадение оценок «20 Century» и [15] для испарения с поверхности океана (3,837 и 3,836 мм/сут.) может быть случайностью. Однако существует подозрение, что авторы проекта «20 Century» калибровали трудно оцениваемые коэффициенты вертикального обмена у границы «атмосфера-подстилающая поверхность» таким образом, чтобы основной управляющий параметр – средняя величина испарения с поверхности океана – совпал с величиной из [15]. Напомним, что работами по вычислению испарения с поверхности Земли в проекте [15] руководил ведущий к тому времени учёный мира, занимавшийся этим вопросом, – М.И. Будыко, обладавший огромным опытом, знаниями и интуицией.

Из сказанного следует, что оценивание средних значений влагосодержания основных компонентов глобальной системы и, в особенности, потоков влаги между ними, в области которого имеется прогресс, по-прежнему представляет собой проблему глобальной гидрологии, причём – одну из основных и трудно решаемых проблем.

Изучение закономерностей изменений глобальных потоков влаги в климатических масштабах времени

Если оценка средних многолетних величин составляющих глобального водообмена представляет значительные трудности из-за сложности увязки многолетних балансов тепла и влаги на границах сред, то ряды отклонений от указанных средних значений представляются рассчитанными более надёжно – в особенности, начиная с конца 1970-х гг., когда стали доступны спутниковые наблюдения. На рис. 2 показаны рассчитанные нами, с использованием данных реанализа проекта «20 Century», изменения месячных величин основных потоков влаги в глобальном гидрологическом цикле за 20 лет – с 1993

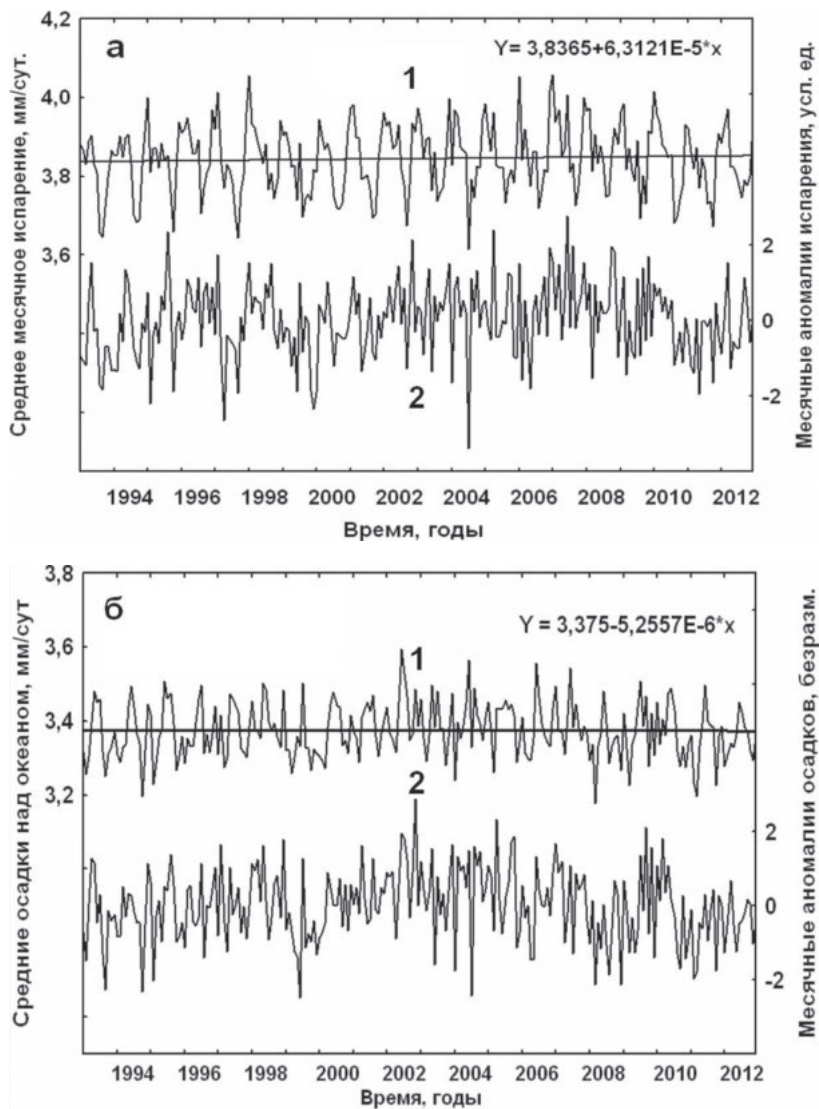
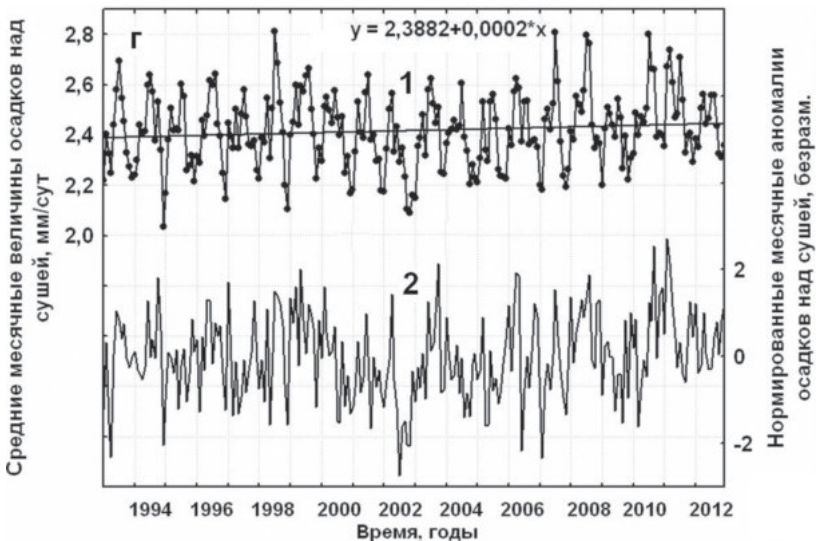
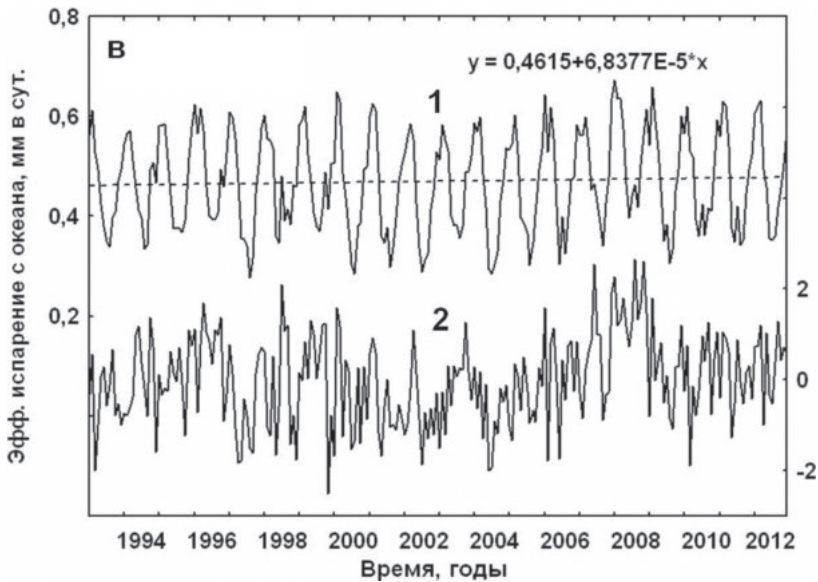
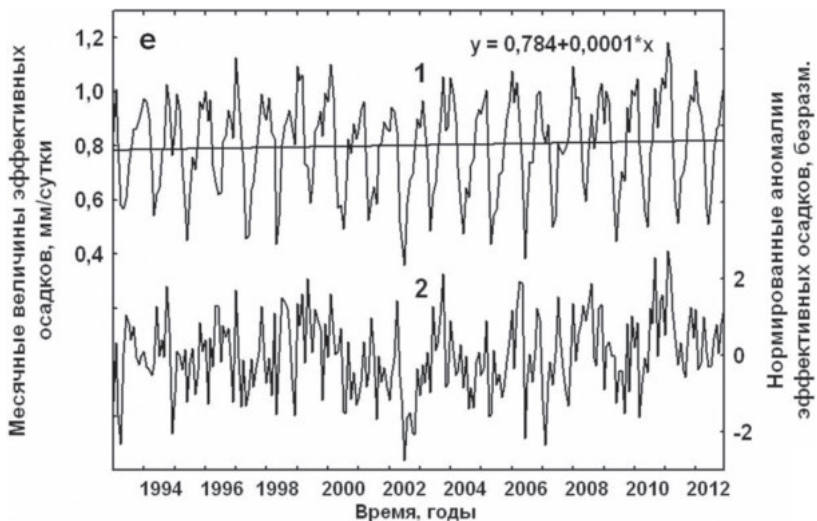
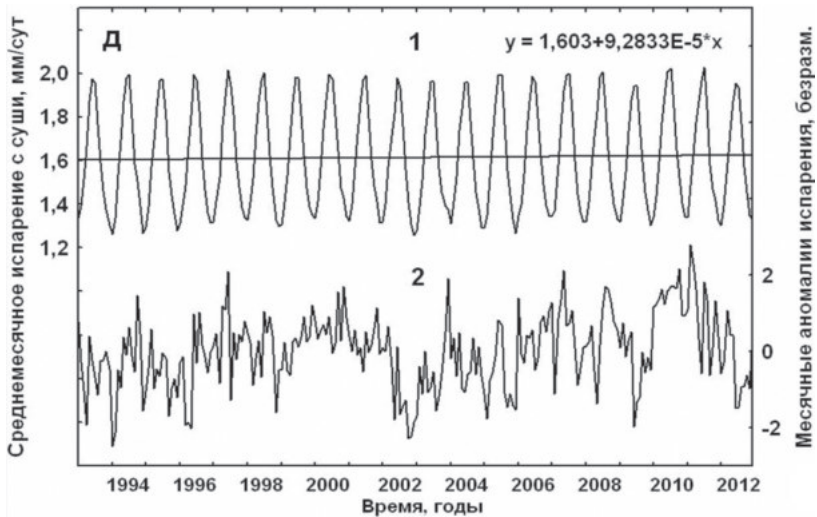


Рис. 2. Изменения во времени испарения с поверхности океана (а), осадков над океаном (б), горизонтального влагопереноса в атмосфере с океана на сушу – в терминах «эффективного испарения» с поверхности океана (в), осадков над сушей (з), испарения (эвапотранспирации) с поверхности суши (д), «эффективных осадков» (разности «осадки минус испарение») над сушей (е). 1 – месячные величины (левые шкалы), 2 – аномалии месячных величин – с вычитанием среднего сезонного хода и нормированием на средний сезонный ход стандартов (правые шкалы). Рассчитано по данным реанализа проекта «20 Century» [19]



по 2012 гг. Характеристики, отображённые на рис. 2, это: среднее испарение с поверхности океана; осадки над океаном; «эффективное испарение» с поверхности океана (испарение минус осадки), являющееся по существу оценкой горизонтального влагопереноса в атмос-



фере с океана на сушу; осадки над свободной ото льда суши; испарение (эвапотранспирация) с поверхности свободной ото льда суши; «эффективные осадки» над свободной ото льда суши (осадки минус испарение).

Напомним, что рассматриваемый, «для круглого счёта» 20-летний, период характеризовался значительным ростом концентрации парниковых газов в атмосфере и общим ростом глобальной темпе-

ратуры. Изучение рядов на рис. 2 представляет значительный интерес прежде всего с точки зрения того, какова реакция процессов глобального водообмена на глобальный «парниковый» и температурный сигналы. Очевидно, что если такого рода сигналы проявляются в ходе гидрологических процессов, то в первую очередь они должны быть значимыми при глобальном осреднении, сглаживающем региональные и многие другие случайные пульсации. Также, чрезвычайно важно исследовать детальную – месяц от месяца и год от года – структуру изменений составляющих глобального водообмена. Это позволит проверить, в отношении глобального гидрологического цикла, справедливость единственной существующей на настоящей момент теории естественных изменений климата – теории стохастических климатических моделей К. Хассельманна [28].

На рис. 2 в верхних частях (рис. 1) – исходные ряды, в нижних частях (рис. 2) – ряды в месячных аномалиях, то есть, с вычитанием среднего многолетнего сезонного хода и с последующим делением на средние многолетние стандарты соответствующего календарного месяца. Кроме того, на верхних графиках обозначены линейные аппроксимации, полученные методом пространственно-взвешенных наименьших средних квадратов, рядом приведены соответствующие уравнения.

Обращают на себя внимание очень малые, статистически незначимые изменения составляющих глобального влагооборота за рассматриваемый период. Коэффициенты уравнений на рис. 2 свидетельствуют о том, что за 20 лет – за время интенсивного роста концентраций парниковых газов в атмосфере и заметного повышения глобальной температуры – глобальные потоки влаги изменились на ничтожно малые величины. А именно, от $+0,15$ мм в месяц для ряда осадков над сушей до $-0,04$ мм в месяц для осадков над океаном, то есть, от $0,0004$ до $0,0021$ средних значений соответствующих величин.

Анализ структуры рядов аномалий глобальных потоков влаги (рис. 2) при помощи методов, предложенных нами в [6] также свидетельствует о стационарности рядов по математическому ожиданию. Что касается стохастической структуры рядов месячных аномалий, то изменения аномалий испарения с поверхности океана, осадков над океаном, влагопереноса в атмосфере с океана на сушу удовлетворительно описываются моделями реализаций гауссовских белых

шумов. На этом фоне выделяются ряды аномалий осадков над сушей и испарения (эвапотранспирации) с поверхности суши: они описываются реализациями процессов авторегрессии первого порядка с коэффициентом соответственно 0,34 и 0,53. Однако, анома-

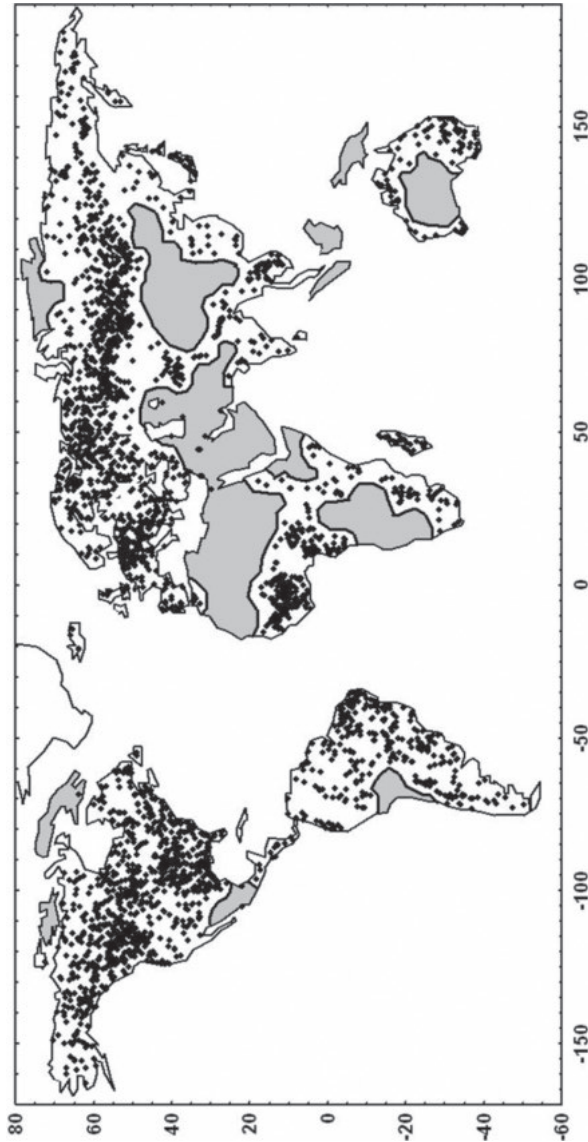


Рис. 3. Расположение использованных в исследовании створов – из созданной автором, на основе 5 международных архивов, базы данных по стоку. Серым цветом обозначены регионы, информация по которым практически отсутствует: в основном территории пустынь тропической и субтропической зоны и «ледяные пустыни» крайнего севера Евразии и Северной Америки

лии разности указанных двух рядов – аномалии «эффективных осадков», которые и формируют речной сток, – вновь, как и первые звенья цепи глобального гидрологического цикла, описываются моделью реализации белого шума. Таким образом, эвапотранспирация играет как бы «отбеливающую роль», превращая красношумный спектр аномалий осадков над сушей в белощумный спектр эффективных осадков. Такая же закономерность была выявлена автором для локальных осадков, эвапотранспирации и эффективных осадков – на материале наблюдений на воднобалансовых станциях в различных природных зонах ЕТР – от тундры до засушливых степей Приазовья [23]. Наконец, следует отметить, что структура ряда годовых эффективных осадков (зачастую называемых также «климатическим речным стоком») за рассматриваемый период аналогична выявленной структуре месячных аномалий эффективных осадков и соответствует белому шуму. Наконец, забегая вперед, следует отметить, что такую же структуру имеет и большинство проанализированы автором рядов годового стока неозерных незарегулированных рек (см. раздел об изменениях речного стока).

Таким образом, из описанного выше анализа вытекают два важных вывода. Прежде всего, становится очевидным, что «парниковый» сигнал пока не отражается статистически значимо в изменениях глобального гидрологического цикла. Второе важное следствие расчётов: они полностью подтверждают теорию естественных изменений климата Хассельманна [28] и основную гипотезу этой теории: белощумность так называемого «погодного возбуждения» – случайного воздействия на подстилающую поверхность со стороны атмосферы в промежуточном и климатическом масштабах частот и периодов. Вместе с тем, указанные выводы нуждаются в дальнейшей проверке и в подтверждении на материале более совершенных реконструкций составляющих глобального водообмена.

Глобальные изменения речного стока

Основной интерес при изучении глобальных гидрологических процессов представляет анализ изменений в глобальном масштабе речного стока – главного источника пресной воды на Земле. Как было отмечено выше, первая попытка такого рода анализа была предпринята в монографии Ратковича «Многолетние колебания

Таблица 2

Показатели нестационарности многолетних рядов годового, максимального и минимального стока для рек всех типов

Тип реки	Показатель	Годовой	Максим.	Миним.
Все типы	ПНО	+6,0%	+8,4%	+21,4%
	ПН+	+3,6%	+2,5%	+20,2%
	ПН–	+2,4%	+5,9%	+1,2%
Неозёрные незарегулированные	ПНО	+3,6%	+3,8%	+17,3%
	ПН+	+3,3%	+1,8%	+17,2%
	ПН–	+0,3%	+2,0%	+0,1%
Озёрные	ПНО	+11,0%	+18,6%	+22,7%
	ПН+	+7,1%	+7,7%	+21,5%
	ПН–	+3,9%	+10,9%	+0,7%
Ледникового питания	ПНО	+9,8%	+6,1%	+29,6%
	ПН+	–2,5%	–2,5%	+16,7%
	ПН–	+12,3%	+8,6%	+12,9%
Зарегулированные	ПНО	+6,4%	+9,6%	+24,5%
	ПН+	+3,1%	+1,9%	+23,0%
	ПН–	+3,3%	+7,7%	+1,5%

речного стока» [17]. Автором настоящей статьи аналогичное исследование было проведено на новом уровне: с использованием на порядок большего объёма информации о стоке (около 9000 многолетних рядов годового, максимального и минимального стока примерно в 3000 створов на всех обитаемых материках, рис. 3), применяя новые – специально разработанные автором для этой цели – методы и формулы оценки статистических и стохастических параметров многолетних колебаний стока [6], с использованием современных ГИС, с учётом современных теорий изменений климата.

Вкратце результаты исследования заключаются в следующем. Кардинальным является вопрос о стационарности/нестационарности изменений стока в масштабе времени порядка десятков лет. В первом случае – стационарности – применима корреляционная теория случайных функций и ее многие важные приложения.

В табл. 2 показаны рассчитанные при помощи предложенной автором методики [6] процентные доли нестационарных, по математическому ожиданию (среднему значению), различных видов стока рек различных типов питания. Аббревиатура ПНО означает общий процент нестационарных рядов, ПН+ – процент нестационарных

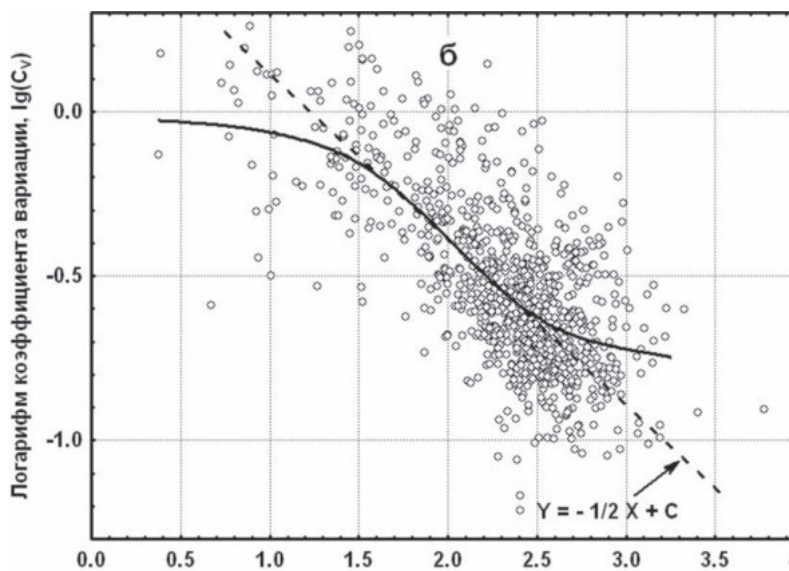
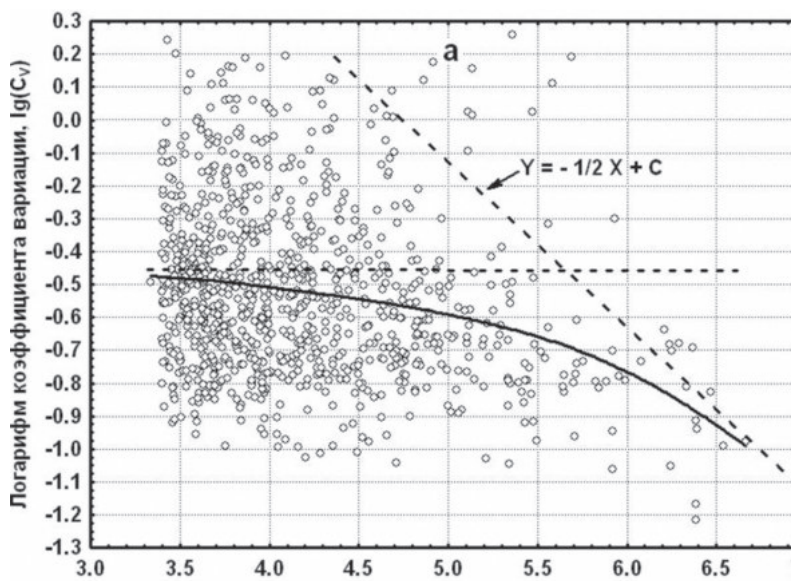


Рис. 4. Зависимости, в билгарифмических шкалах, коэффициента вариации годового стока от площади бассейна (а) и годового слоя стока (б). Неозёрные реки с ненарушенным режимом стока. Сплошные кривые – аппроксимации методом пространственно-взвешенных наименьших квадратов.

нарных рядов с увеличением среднего значения, ПН– с уменьшением среднего значения. Таблица показывает, что в среднем реки всех типов, а также реки основного, наиболее часто встречающегося типа – равнинные неозёрные незарегулированные – демонстрируют лишь незначительную долю нестационарных рядов годовых величин стока (не превосходящую ошибки метода). Доля нестационарных рядов годового стока других типов рек, а также рядов минимального стока всех типов рек более значительна, однако и в последнем случае, для основного типа рек, не превышает $1/6$ всех рядов. Необходимо отметить, что использованная методика предусматривает сравнительно «жёсткий» критерий нестационарности; методические проблемы оценки степени стационарности нуждаются в дальнейшем изучении.

Важное значение имеет изучение зависимостей такого ключевого параметра изменений стока, как коэффициента вариации, C_V , от морфологических характеристик водосборных бассейнов. На рис. 4 показаны зависимости C_V годового стока рек основного типа от площадей водосбора и среднего слоя годового стока.

Рисунок демонстрирует фундаментальный закон «степени минус одна вторая» зависимости от площадей бассейнов в диапазоне их больших значений и от годового слоя стока в диапазоне наиболее распространённых значений – от примерно 30 до 300 мм в год. Другой важный итог изучения стока в глобальном масштабе – вывод о преобладающем типе стохастических моделей для описания многолетних колебаний расходов. Начиная с первых работ в этой области С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля (см. обзор в [13]) считалось, что преобладающую, чуть ли не универсальную роль при описании многолетних рядов годовых значений речного стока играют так называемые простые марковские цепи (по существу, процессы авторегрессии первого порядка или «марковские процессы первого порядка»). Причиной этого был естественный факт неравенства нулю выборочных значений коррелированности стока смежных лет. Детальный анализ большого числа длинных рядов годового стока из нашего архива при помощи аккуратных оценок статистических и стохастических параметров показал, тем не менее, что реальная картина существенно отличается от общепринятых представлений.

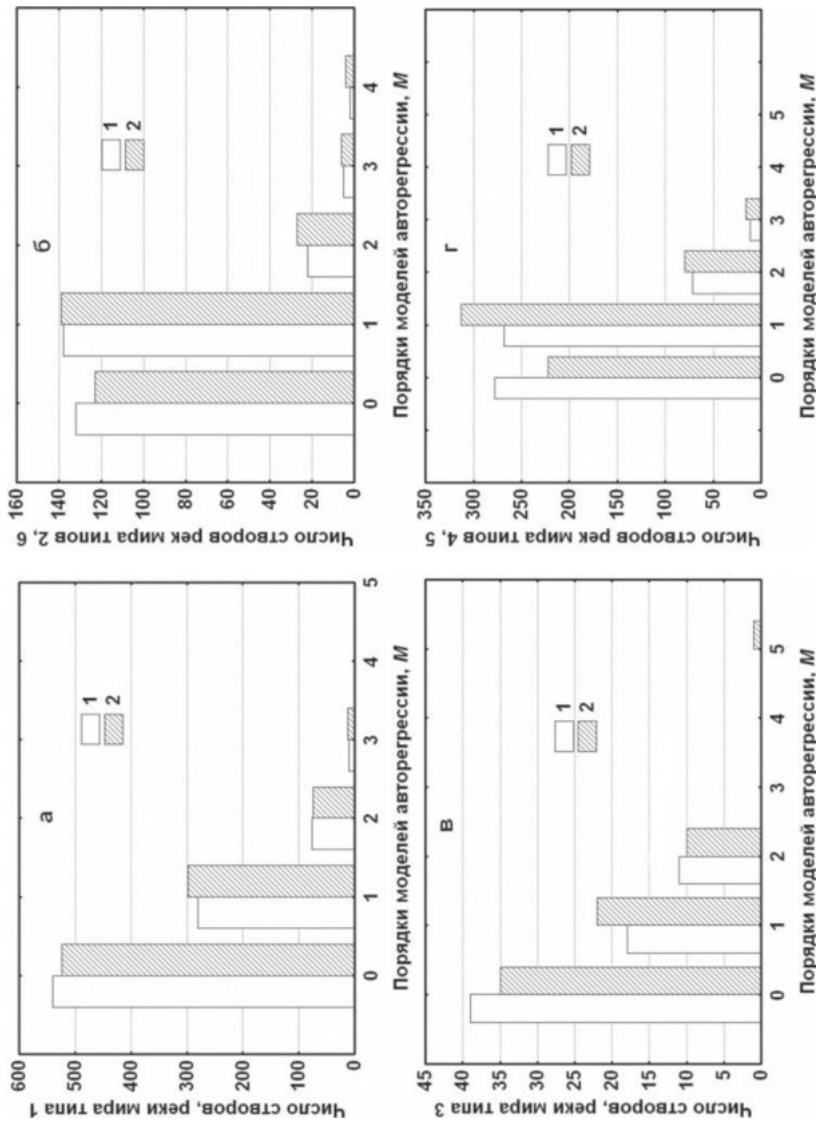


Рис. 5. Гистограммы порядков авторегрессионных моделей рядов годового стока рек мира. a – реки основного типа – неозёрные незарегулированные, смешанного типа питания; $б$ – озёрные реки; $в$ – реки ледникового питания; $г$ – зарегулированные реки. 1 – исходные ряды; 2 – ряды, пересчитанные в ряды выборочных значений гауссовских величин.

На рис. 5 представлены распределения стохастических (авторегрессионных) моделей рядов годовых величин стока четырёх групп рек. Графики показывают, что для основного типа рек и водосборов – неозёрных незарегулированных дождевого или смешанного снегового-дождевого питания – процент моделей нулевого порядка (реализаций белых шумов) не только превосходит процент моделей первого порядка («простых марковских цепей»), но и превосходит процент моделей всех порядков больше нулевого, вместе взятых. Для рек озёрных и рек, вытекающих из искусственных озёр – водохранилищ, – доля моделей первого порядка лишь ненамного превосходит долю моделей нулевого порядка. Заметим также, что на эту картину не влияет принципиально факт асимметричности плотности вероятности стока.

В [6] приведены аналогичные результаты для максимального и минимального стока, а также отдельно – для каждого из материков и для каждого из 23 важнейших речных бассейнов мира. Вкратце укажем, что в рядах максимального стока для всех генетических типов водосборов абсолютно преобладающую роль играют модели белого шума, в рядах минимального стока со всех типов водосборов преобладают (хотя и не столь значительно) модели первого порядка.

Отметим также другие, не описанные ранее интересные результаты, полученные нами при анализе большого числа стоковых рядов: явление «бифуркации» порядков моделей максимального и минимального стока при переходе от малых и/или засушливых водосборов к большим по площади/увлажненным водосборам; наличие максимумов коррелированности стока смежных лет на определённых значениях среднего годового слоя стока; наличие аномальных, в отношении стохастической структуры стоковых рядов, регионов – прежде всего Приленского плато и бассейна Северной Двины и др.

Анализ параметров экстремальных гидрологических явлений – наводнений и засух – в глобальном масштабе

В лаборатории глобальной гидрологии ИВП РАН, по-видимому впервые, создана объединённая электронная база данных по наводнениям и засухам мира: использованы данные по 1900 наводнениям за 1998–2015 гг. [29] и по 1700 локациям засух за 1900–2015 гг. При этом мы

пользовались следующим определением наводнения/засухи, соответствующим логике определения из [1]: «временное увеличение/уменьшение увлажнённости территорий, приводящее к материальным и/или социальным (гуманитарным) ущербам». По материалам исследований опубликована первая, в отечественной и мировой

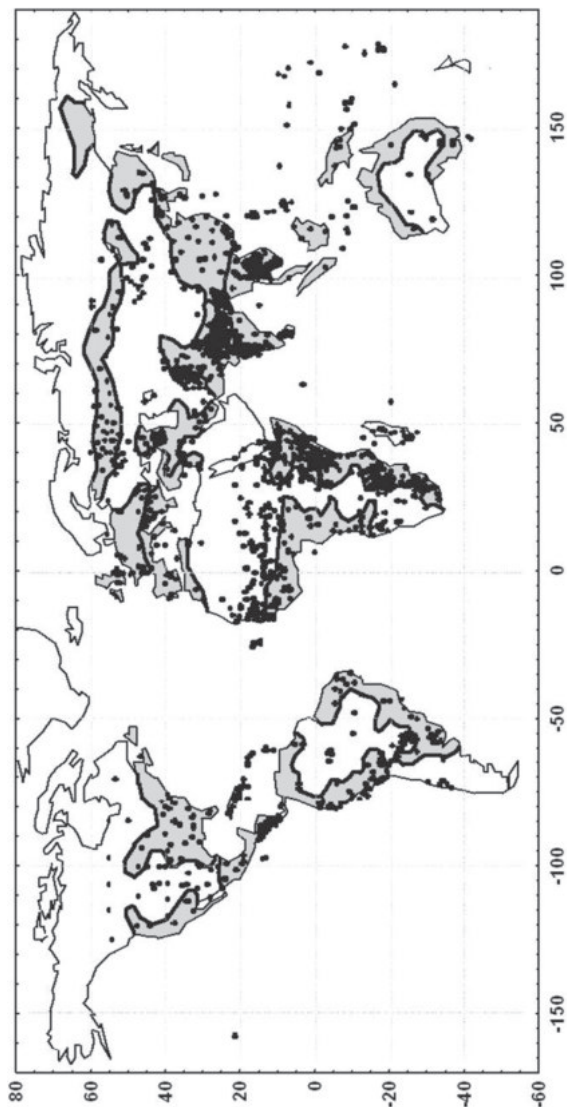


Рис. 6. Основные ареалы центров наводнений вследствие экстремальных осадков в жидкой фазе (отмечены серым цветом) и центры локаций засух (отмечены точками)

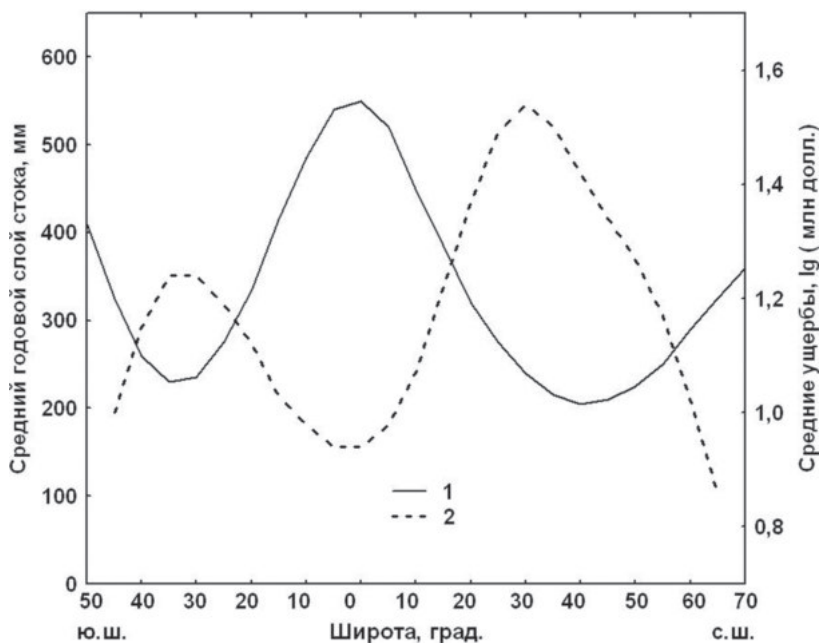


Рис. 7. Меридиональные профили осредненных по широтам средних годовых слоёв стока (1, левая шкала) и средних ущербов от наводнений всех генетических типов (2, правая шкала)

литературе, монография [7], в которой был дан количественный анализ параметров наводнений в глобальном масштабе. В лаборатории готовится аналогичная монография по засухам мира.

Результаты исследований экстремальных гидрологических ситуаций в глобальном масштабе были во многом неожиданными. Так, оказалось, что между двумя, казалось бы диаметрально противоположными, типами экстремальных гидрологических ситуаций существуют определённые черты сходства. Прежде всего, это относится к географическому положению основных регионов наводнений и засух. На рис. 6 центры локаций засух наложены на контуры основных ареалов наводнений «ливневого типа» (вследствие аномальных осадков в жидкой фазе) – преобладающих как по числу, так и по вызванным ими ущербам и в РФ, и в мире. Рисунок показывает, что за исключением южной части Сахары и Среднего Запада США (и, естественно, Колымского ареала наводнений) ареалы наводнений указанного типа и ареалы засух, в основном, сходны. Резуль-

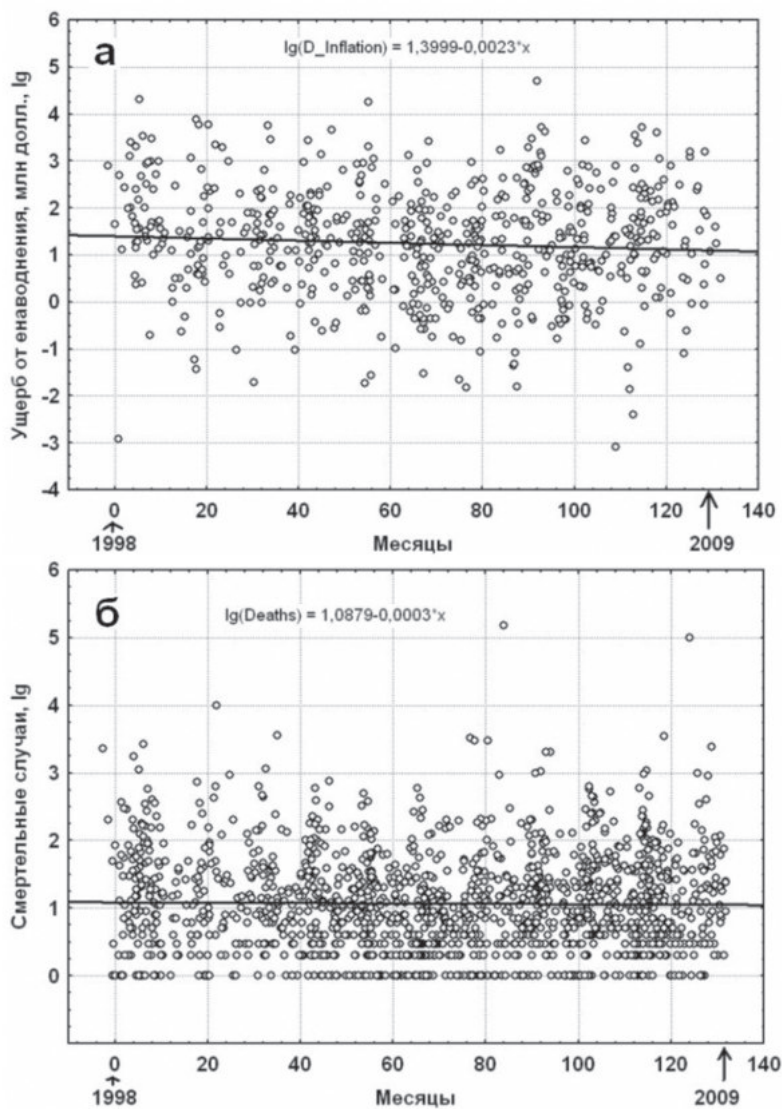


Рис. 8. Изменения во времени ущербов от наводнений мира всех типов с учётом инфляции (а) и числа смертельных случаев (б). Сплошные линии – линейные аппроксимации методом пространственно-взвешенных наименьших средних квадратов; соответствующие уравнения представлены в верхней части рисунков

татом этого является и сходный тип распределения по широтам ущербов от двух типов экстремальных ситуаций. Напротив, среднее распределение по широтам ущербов от наводнений парадоксальным образом находится почти в противофазе с распределением по широтам основного параметра увлажненности суши – слоёв годового стока (рис. 7).

Указанные результаты являются одним из свидетельств того, что и наводнения, и засухи являются не только – может быть, не столько – природными, сколько социально-экономическими явлениями: они наблюдаются в основном в зонах с наибольшей плотностью населения и/или в наиболее экономически развитых регионах мира.

Другой неожиданный результат исследования – характер изменений во времени «природных» параметров наводнений и засух и характеристик социально-экономических ущербов от этих катастроф. Чрезвычайно широко распространено мнение о том, что по мере накопления парниковых газов в атмосфере и по мере увеличения глобальной температуры ущербы от экстремальных гидрологических явлений и разного рода катастроф растут. Такое мнение разделяют не только средства массовой информации, но и большое число научных сотрудников. Однако, расчёты с использованием наших баз данных по связанным с водой катастрофам, не подтверждают этого. Так, на рис. 8 показаны изменения материальных ущербов (с учётом инфляции) и числа смертельных случаев от наводнений всех типов за конец 1997 – начало 2009 гг. На рис. 9 показаны изменения ущербов и числа пострадавших от засух за 1976–2015 гг. Во всех этих, приведённых в качестве примера, случаях статистически значимые изменения как суммарных годовых, так и средних в расчёте на одно явление, величин – отсутствуют.

Другой интересный результат изучения связанных с водой катастрофических явлений в глобальном масштабе – сопоставление различных параметров ущербов от этих явлений, понесённых, с одной стороны, экономически развитыми регионами мира, а с другой – развивающимися регионами. На рис. 10 эти результаты представлены вместе с соответствующими величинами в среднем для мира и для РФ. Как показывают расчёты, абсолютные величины материальных ущербов как от засух, так и от наводнений – и относительные

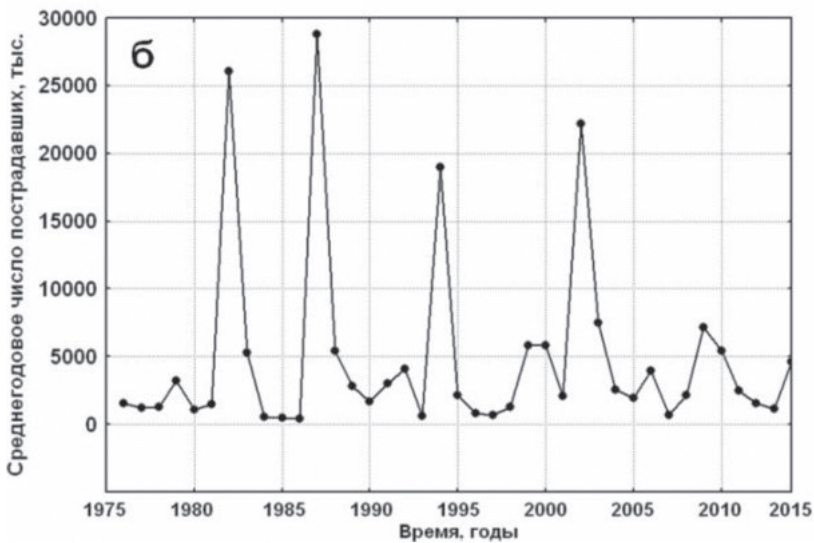
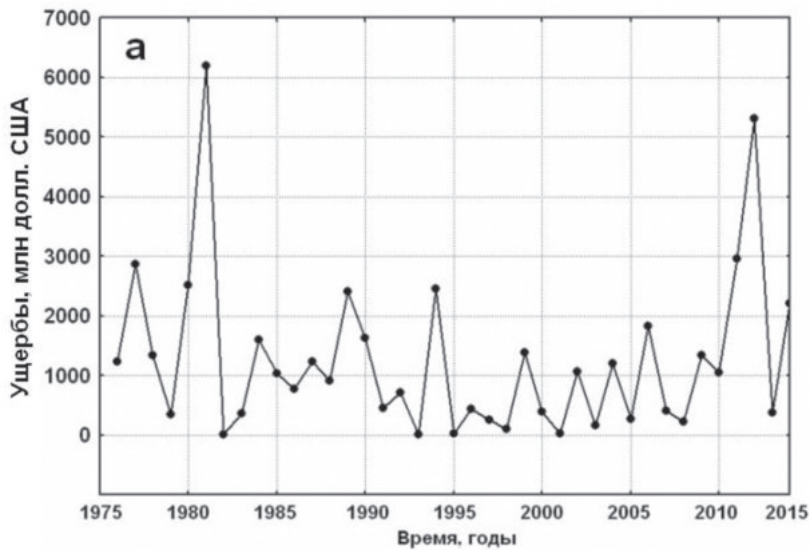


Рис. 9. Изменения во времени ущербов от засух мира (а) и числа пострадавших от засух (б)

величины (в расчёте на одно явление, на единицу площади страны, на душу населения) – в развитых странах больше, чем в развивающихся (рис. 10 б). Однако, доля ущербов в ВВП стран в «богатом»

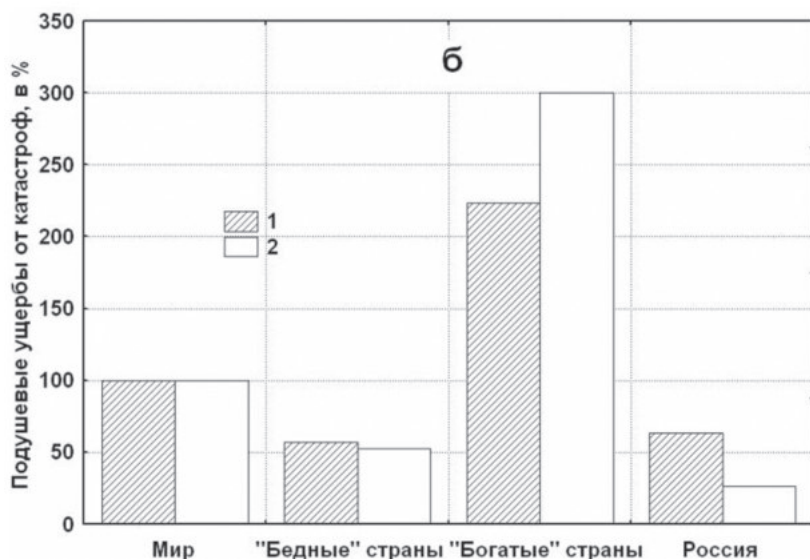
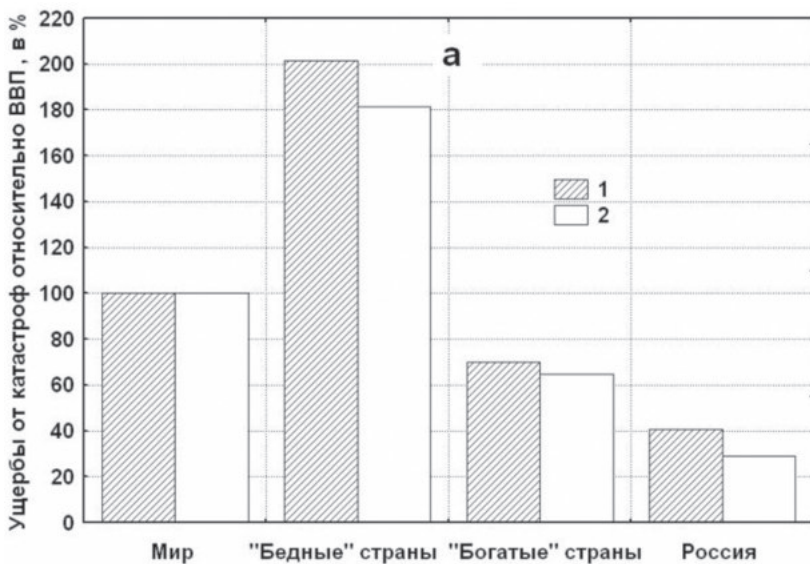


Рис. 10. Финансовые ущербы от засух (1) и наводнений (2) мира в расчете на единицу ВВП (а) и на душу населения (б) в макрорегионах мира с разным уровнем экономического развития и в РФ. Для сопоставимости результаты приведены в процентных модульных коэффициентах: величины соответствующих характеристик, осреднённые по всем странам мира, приняты за 100%

регионе намного меньше, чем в «бедном» (рис. 10 а). На основе этих результатов можно сформулировать гипотезу о том, что в отдалённой перспективе, параллельно с существенным ростом экономики, ущербы от наводнений и засух неизбежно растут – в связи с освоением новых территорий, удорожанием недвижимости и инфраструктуры, увеличением страховых премий и т.д. Однако, по мере экономического развития стран – несмотря на общий рост ущербов от засух и наводнений – хозяйство стран в целом более эффективно использует потенциально затапливаемые или потенциально засушливые территории – и через механизм страхования, перестрахования и фондовых бирж делит ущербы сравнительно равномерно по территориям и отраслям хозяйства.

Приведённая выше гипотеза была сформулирована в работе [ДИ2006]. Показательно, что более поздние расчёты с использованием информации по засухам мира дали ту же качественную картину. Рис. 10 показывает, что связанная с рассматриваемыми природно-социальными катастрофами ситуация в РФ сравнительно благополучна. Однако, если проанализировать соотношение материальных и гуманитарных (число эвакуированных, общее число пострадавших) потерь от наводнений и засух, очевидно, что в РФ есть резервы в первую очередь для уменьшения гуманитарных (социальных) ущербов: соотношение указанных параметров гуманитарных и материальных потерь в РФ меньше, чем в развивающихся странах, но на порядок больше, чем в развитых.

Ввиду ограниченного объёма статьи нет возможности привести полученные в лаборатории глобальной гидрологии другие интересные и важные результаты анализа связанных с водным фактором катастроф мира: статистики различных характеристик катастроф, зависимости параметров ущербов от «природных» параметров явлений, особенности наводнений и засух в пределах различных ареалов и т.д.

Сверхдолгосрочное прогнозирование увлажнения и осушения территорий в глобальном масштабе

Проблема, сформулированная в подзаголовке, носит существенно междисциплинарный характер и разрабатывается в основном в рамках построения численных моделей климатической системы (КМОЦ). Роль гидрологии заключается здесь прежде всего в разра-

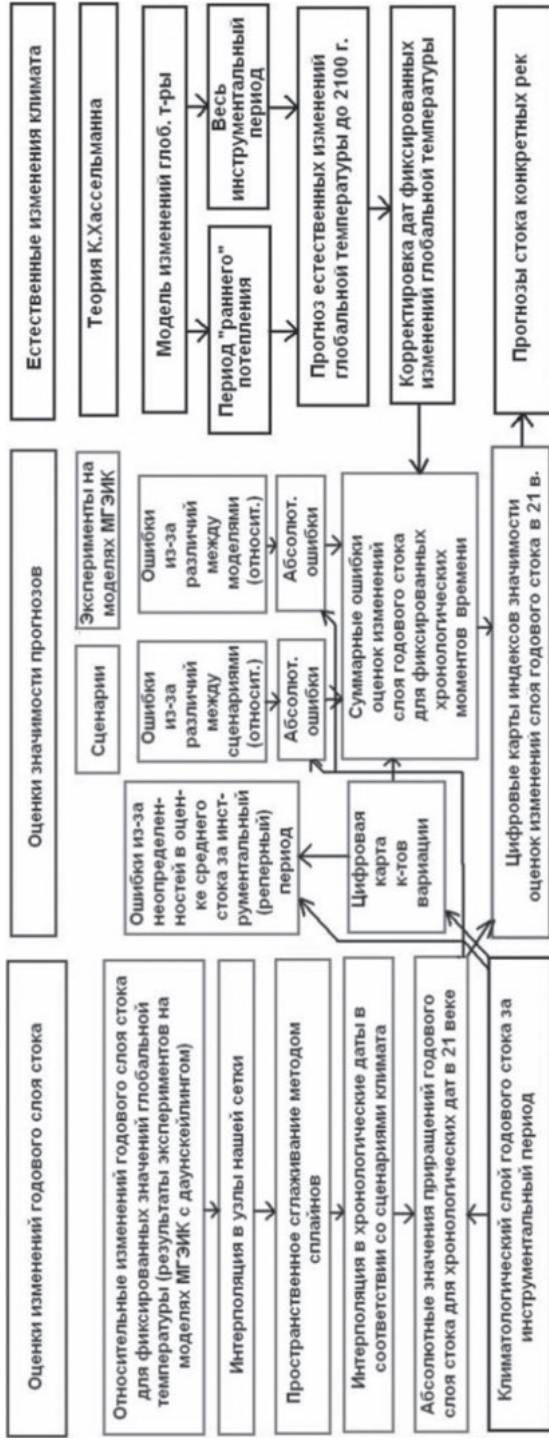


Рис. 11. Блок-схема расчётов оценок неопределённости прогнозов годового стока в 21 в.

ботке блоков гидрологии суши, которые входят составной частью в модели климатической системы – и в разработке ещё более детальных блоков гидрологии суши, которые служат для «даунскейлинга» результатов, полученных на КМОЦ. Наряду с этим, роль собственно «глобальной гидрологии» виделась нами и в изучении слабо разработанного вопроса о степени достоверности сверхдолгосрочных прогнозов увлажнённости континентов, об источниках неопределённостей и их эффектах в отношении соответствующих. С этой целью нами были исследованы четыре источника неопределённостей оценок увлажнения суши в отдалённой перспективе: ошибки вследствие расхождений между сценариями эмиссии парниковых газов, из-за расхождений между различными КМОЦ; из-за возможных естественных изменений глобального климата; вследствие ошибок оценок математического ожидания величин стока за «реперный» период наблюдений. Если эффекты первых двух типов неопределённостей приводились ранее в литературе, причём, как правило, по отдельности (например, в [21]), то последние два источника неопределённостей прогнозов практически не изучались. Указанная проблема решалась нами с использованием модельных экспериментов (как «исторических», так и прогностических) на КМОЦ в рамках проектов СМIP-3 и СМIP-5, с использованием даунскейлинга и без него, а также с использованием нашей глобальной базы по речному стоку и результатов её анализа.

Используя алгоритм, схема которого представлена на рис. 11, нами был произведён расчёт стандартов ошибок прогнозов годового слоя речного стока на протяжении 21 в. – для характерных срезов по времени 2025, 2050, 2075 и 2100 г. Нарис. 12, в качестве примера, показаны карты «индекса неопределённости» прогнозов изменений годового слоя стока для середины века: вверху для 6 сценариев эмиссии парниковых газов МГЭИК [21], внизу – для сценария Московского энергетического института (Академии) [12]. Из рисунка видно, что сценарий МЭИ (который представляется нам более адекватным) даёт статистически незначимые изменения слоя стока из-за парникового эффекта для большей части суши. Лишь на крайнем севере Евразии и Северной Америки и на северо-востоке Евразии изменения превышают стандарты ошибок прогноза (но не превышают двойной стандарт).

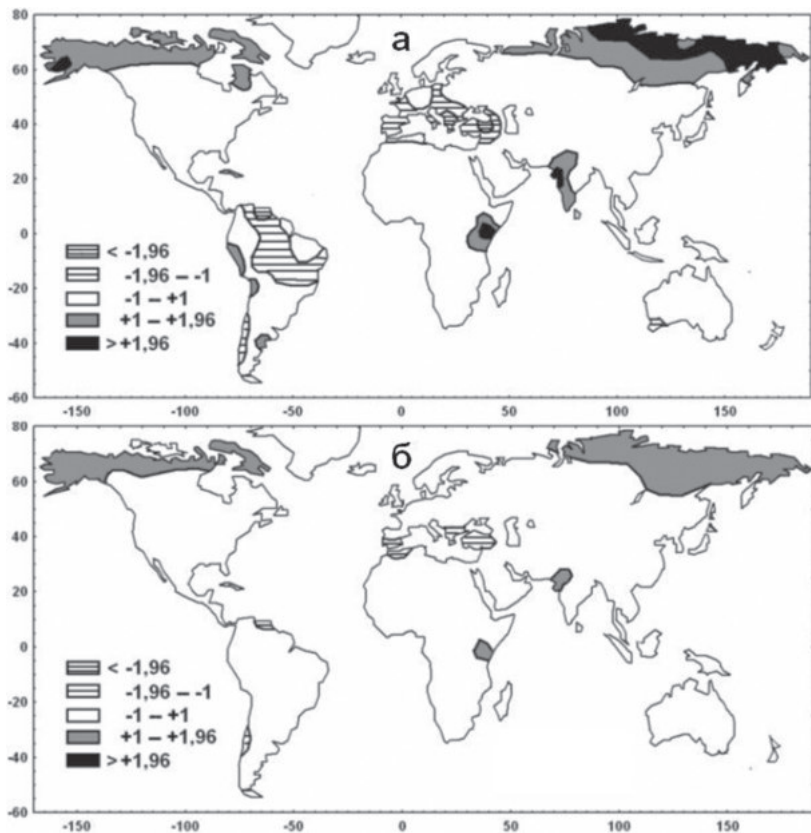


Рис. 12. Карты «индекса неопределённости» прогнозов годового слоя речного стока – отношения прогнозируемых изменений к стандартам ошибок прогноза для середины 21 в. а – с учётом 6 сценариев климата МГЭИК, б – с учётом сценария МЭИ

Сценарии МГЭИК, в свою очередь, дают более значительное увеличение стока на севере и северо-востоке Евразии, превышающие двойной стандарт ошибок – то есть, имеющие обеспеченность более 95%. При этом, в отличие от сценария МЭИ, выделяются и две обширные области уменьшения стока – в приэкваториальных областях Южной Америки и в регионе Большого Средиземноморья. Добавим, что для расчетов использованы результаты моделирования стока на 21 модели климатической системы МГЭИК с так называемым гидрологическим даунскейлингом – с использованием дополнительного гидрологического блока.

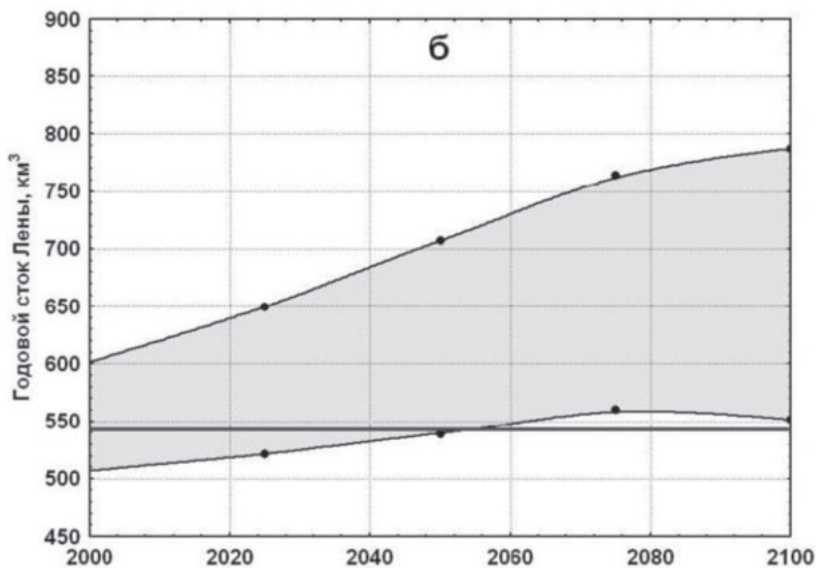
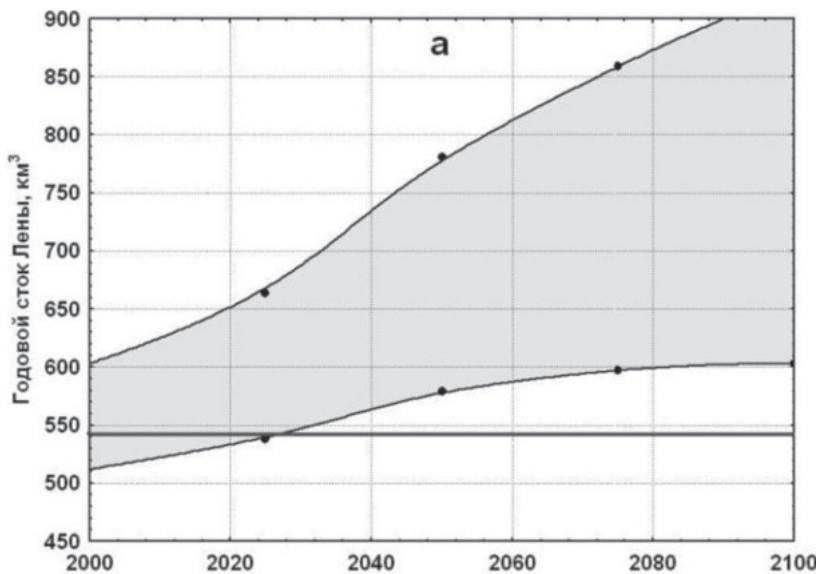


Рис. 13. Изменения годового стока Лены плюс-минус стандарты ошибок прогноза. Горизонтальная прямая – средний сток за реперный период (1960–90 гг.). а – для 6 сценариев МГЭИК, б – для сценария МЭИ

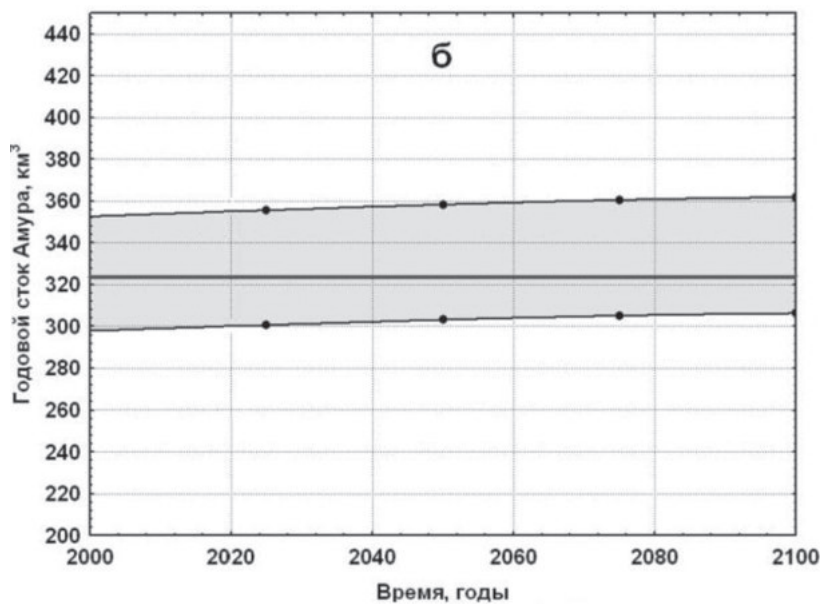
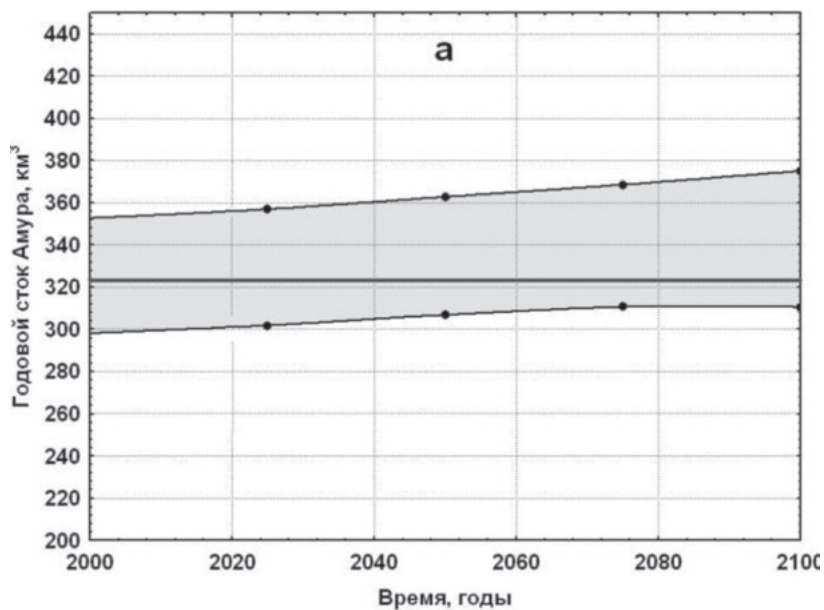


Рис. 14. То же, что рис. 13, но для р. Амур

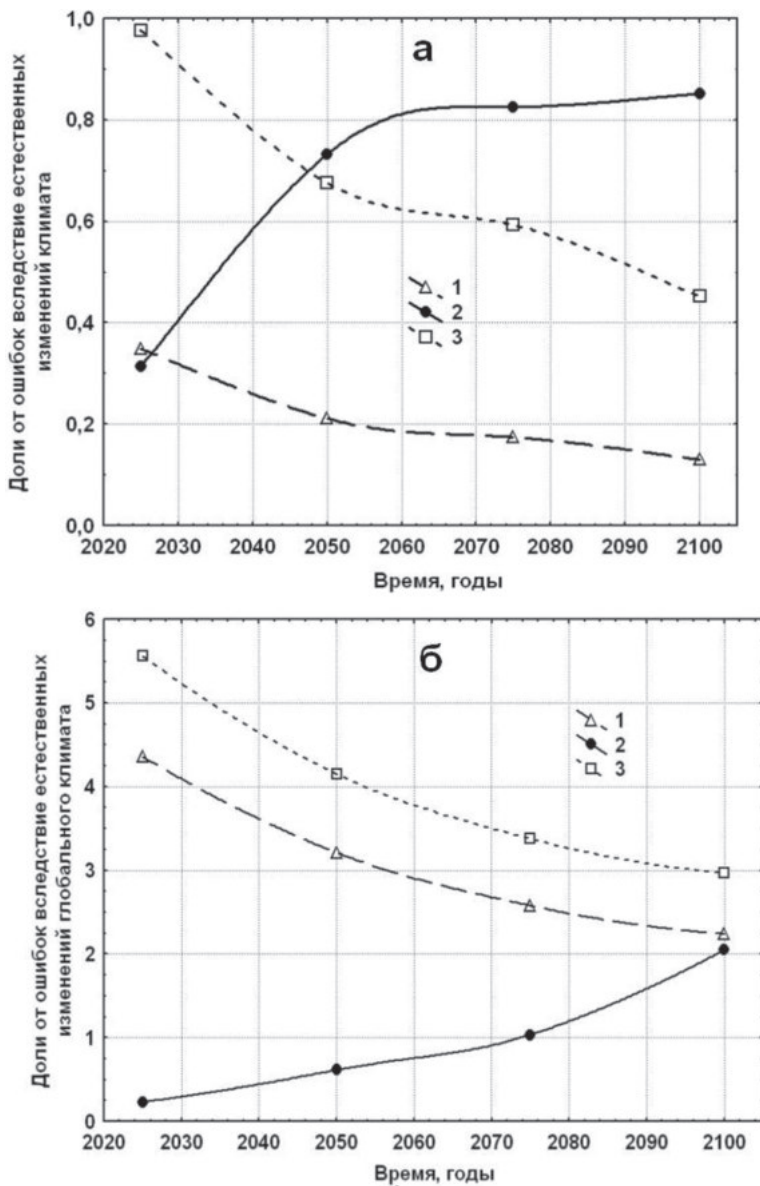


Рис. 15. Отношение стандартов ошибок прогноза годового стока Лены (а) и Амура (б) вследствие ошибок оценок среднего стока за реперный период (1), расхождений между сценариями климата (2), расхождений между моделями климата (3) – к стандартам ошибок вследствие возможных естественных изменений глобального климата

Отметим также, что для конца первой четверти 21 в. аналогичные расчёты дают, с использованием сценария МЭИ, повсеместную статистическую незначимость прогнозируемых изменений слоя годового стока: на всей территории свободной ото льда суши прогнозируемые изменения меньше стандарта ошибок прогноза.

На рис. 13 и 14 показаны рассчитанные нами прогнозы (в среднеквадратичном) изменений годового стока Лены и Амура в створах, близких у устьям. Если прогноз стока Амура не показывает статистически значимых его изменений на протяжении всего 21 в., то Лена (наряду с такими реками, как Юкон, Индигирка, Яна, Колыма) демонстрирует возможность существенного увеличения стока уже к середине века. В то же время, при учёте сценария МЭИ (рис. 13 б) вполне вероятно сохранение современного стока этих рек даже в ближайших к устью створах на протяжении всего века.

Показательна эволюция во времени неопределённостей прогнозов стока рассматриваемых двух рек – «антиподов» (рис. 15). Для Лены характерно преобладание неопределённости вследствие возможных естественных изменений глобального климата на протяжении всего века над всеми остальными неопределённостями. При этом относительная неопределённость вследствие ошибок оценки среднего за реперный период и вследствие расхождений между моделями уменьшается, а неопределённость из-за расхождений между сценариями растёт. Для Амура характерна менее значительная роль неопределённости вследствие возможных естественных изменений глобального климата и другие соотношения между неопределённостями вследствие иных причин.

Заключение

Ограниченный объём статьи не даёт возможность остановиться на других важных разделах глобальной гидрологии, в частности на исследованиях в области глобальной палеогидрологии, в области изучения изотопного состава водных оболочек, в отношении применения аэрологического метода в гидрологии и многих других. В заключение попытаемся перечислить лишь наиболее насущные проблемы современной глобальной гидрологии.

Само название рассматриваемой области науки говорит о том, что ключевую роль в ней играет сбор и анализ информации о гидроло-

гических объектах и процессах в глобальном масштабе. Наиболее известная организация, занимающаяся сбором информации о важнейшей гидрологической характеристике – речном стоке (центр в г. Кобленц, ФРГ) – как известно, разрешает лишь ограниченное пользование её архивами. Таким образом, продолжает быть насущным формирование актуализированных архивов и баз данных по стоку и другим гидрологическим параметрам в глобальном масштабе.

На повестке дня стоит также объединение электронных баз данных по стоку, параметрам озёр и водохранилищ, характеристикам наводнений и засух. В отношении объединения электронных архивов по стоку и водохранилищам такого рода работа уже ведётся в ИВП РАН/

Актуальной остаётся оценка средних многолетних величин влагосодержания основных компонентов климатической системы и средних потоков влаги между ними.

Междисциплинарная проблема гидрологии заключается в том, чтобы добиться более адекватного описания наблюдаемых изменений гидрологических характеристик в рамках численных моделей климатической системы (см. об этом в [8]). Очевидно, это будет достигаться путём как совершенствования гидрологических блоков КМОЦ, так и совершенствования глобальных моделей гидрологии суши, используемых для «даунскейлинга» полученных на КМОЦ результатов. Возникающая при этом сложность – неизбежное искажение при даунскейлинге оригинальных балансов и потоков влаги на границе «суша-атмосфера», рассчитанных на КМОЦ.

Другая междисциплинарная проблема – анализ нестационарностей стока и других гидрологических характеристик в климатических масштабах времени, возникающих вследствие общей несбалансированности климатической системы. В частности – оценка критических пространственно-временных масштабов, на которых может проявляться такого рода нестационарность, исследование «масштабной инвариантности» климатической системы применительно к гидрологическим характеристикам и т.п.

Проблемой является также привлечение к исследованиям в области глобальной гидрологии необоснованно, с нашей точки зрения, полузабытых подходов – которые, тем не менее, могут дать ответ на существенные общие вопросы рассматриваемого раздела

науки. Это – построение динамико-стохастических моделей системы «гидросфера-атмосфера» при помощи так называемых моделей средней сложности, при помощи энергобалансовых моделей, «концептуальных» гидрологических моделей.

Необходим дальнейший сбор информации и формирование баз данных по «естественным» параметрам и характеристикам социально-экономических ущербов, вызываемых основными типами катастроф, связанных с водным фактором – наводнений и засух. Имеющиеся ряды такого рода параметров, прежде всего, параметров наводнений, зачастую не позволяют применить для их анализа прикладные методы случайных функций.

Чрезвычайно актуально создание единого центра в форме подразделения АН, который осуществлял бы целенаправленный научный мониторинг, сбор и анализ информации о связанных с водным фактором катастрофах – наводнениях и засухах. Примером такого центра может служить бывшая Дартмутская обсерватория наводнений (США).

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения как глобальная многоаспектная проблема. Вестник РАН, 2002. Т. 72. №12. С. 1–21.
2. Будыко М.И., Герасимов И.П. Тепловой и водный баланс земной поверхности, общая теория физической географии и проблем преобразования природы // Материалы к 3-му съезду Географического общества СССР. Л.: Географическое общество СССР, 1959. 18 с.
3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: Академия, 2008. 320 с.
4. Добровольский С.Г. Аномалии глобального теплообмена. М.: Советский геофизический комитет, 1991. 128 с.
5. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М.: Геос, 2002. 232 с.
6. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: Геос, 2011. 660 с.
7. Добровольский С.Г., Истомина М.Н. Наводнения мира. М.: Геос, 2006. 256 с.
8. Добровольский С.Г., Татаринovich Е.В., Юшков В.П. Сток важнейших рек России и его изменчивость по данным климатических моделей проекта СМIP-5. Гидрология и метеорология, 2016. №12. С. 44–62.
9. Догановский А.М., Малинин В.М. Гидросфера Земли. СПб: Гидрометеоздат, 2004. 631 с.
10. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 378 с.

11. Клите Р.К. Изменения глобального водообмена. М.: Наука, 1985. 248 с.
12. Клименко В.В., Клименко А.В. Глобальное потепление: враг или союзник? М.: Институт проблем энергетической эффективности МЭИ, 2 июня 2010. Адрес в Интернете: www.energy2010.mpei.ru/_Files/KlimenkoVV.ppt.
13. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1981, 255 с.
14. Львович М.И. Вода и жизнь. М.: Мысль, 1986. 256 с.
15. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Ред. В.И. Корзун и др. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 639 с.
16. Привальский В.Е. Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры). М.: Наука, 1985. 184 с.
17. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 256 с.
18. Эдельштейн К.К. Гидрология материков. М.: Академия, 2005. 304 с.
19. 20 Century, 2016. Сайт в Интернете: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds131.1/>.
20. Baumgartner A., Reichel E. Die Weltwasserbilanz. Munhen-Wien.: Oldenburg Verlag, 1975. 175 pp.
21. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Адрес в Интернете: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Ut4f4BuGj84>.
22. CMAP, 2016. Сайт в Интернете: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cmap-cpc-merged-analysis-precipitation>.
23. Dobrovolski S.G. Global climatic changes in water and heat transfer-accumulation processes. Amsterdam et al.: Elsevier, 1992, 282 pp.
24. Dobrovolski S.G. Stochastic climate theory. Heidelberg et al.: Springer Verlag, 2000. 296 pp.
25. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Isotopes of the earth's hydrosphere. Heidelberg et al.: Springer Verlag, 2012. 577 pp.
26. GPCP, 2016. Сайт в Интернете: https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data_gpcp.html.
27. GRDC, 2017. Сайт в Интернете: http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepag_node.html.
28. Hasselmann K. Stochastic climate models part I. Theory // Tellus, 1976. Vol. 28. P. 473–485.
29. Istomina M.N., Dobrovolski S.G. Floods of the world: quantitative analysis of natural characteristics and parameters of social-economic damages. Water Resources, 2016. Vol. 43. No 3, 459–471.
30. Kuznetsova L.P. Use of data on atmospheric moisture transport over continents and large river basins for the estimation of water balances and other purposes. Technical documents in hydrology. Paris: UNESCO, 1989, 150 pp.
31. NCEP/NCAR, 2016. Сайт в Интернете: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

Современное состояние и перспективы гидрологии устьев рек

М.В. Михайлова, В.Н. Михайлов

Введение

Устья рек – характерные элементы береговой зоны океанов, морей, озёр; протяжённые в пространстве и очень изменчивые во времени географические объекты; места одновременного и противоположно направленного воздействия рек (их стока воды и наносов) и приёмных водоёмов (изменения их среднего уровня, приливов, сгонно-нагонных явлений, волнения). Устья рек были на Земле во все геологические периоды и эпохи, когда существовали как материки с реками, так и окружающие сушу океаны и моря.

Устья рек уже в древние времена стали очагами цивилизаций, здесь селились люди, на плодородных речных отложениях начало развиваться орошаемое земледелие, а в водных объектах – рыболовство. Через устья рек шло освоение европейцами Северной и Южной Америки, русскими землепроходцами – Сибири.

Устья некоторых рек мира были впервые описаны путешественниками и географами Древней Греции и Древнего Рима.

Благоприятное географическое положение устьев рек между сушей и морями, а также богатые водные, земельные, биологические ресурсы этих объектов привели к возникновению здесь крупных городов, промышленных центров, портов и даже столиц ряда государств. Практические потребности (освоение упомянутых ресурсов, поддержание судоходства через устья рек, защита земель и населённых пунктов от наводнений речного и морского происхождения, а в последнее время и развитие в устьях ряда рек нефтегазовой индустрии) стимулировали исследования этих объектов.

К настоящему времени в науках, изучающих устья рек, сформировались две основные научные школы, включающие ряд направлений.

Первой (ещё в 19 в.) сформировалась геолого-геоморфологическая школа, которая основное внимание уделяла исследованию древнедельтовых отложений (частично в связи с поиском месторождений нефти и газа). В рамках этой школы возникло геоморфологическое направление, изучающее развитие дельтовых берегов. Обзор зару-

бежных работ в области геологии и геоморфологии дельт дан в [1]. В нашей стране значительные результаты в геоморфологии дельт и их берегов получили В.П. Зенкович, П.А. Каплин, В.Н. Коротаев, О.К. Леонтьев, Г.И. Рычагов, Г.А. Сафьянов, А.А. Свиточ, И.С. Шукин.

Вторая школа в изучении устьев рек – гидрологическая. Её развитие привело к возникновению новой отрасли науки – гидрологии устьев рек, промежуточной между гидрологией рек и океанологией, и частично связанной с геоморфологией устьев рек. В гидрологической школе оформились два разных направления в изучении устьев рек – отечественное и зарубежное. Различия между ними обусловлены тем, что в Западной Европе и США преобладали устья рек эстуарного типа, а в нашей стране – дельтового. За рубежом в связи с хозяйственным использованием эстуариев были проведены крупные исследования динамики и смещения вод в эстуариях, воздействия штормовых нагонов, процессов заносимости судоходных каналов. Наиболее важные результаты исследований эстуариев за рубежом приведены в [4, 26–30].

Главная особенность гидрологического направления в изучении устьев рек в нашей стране – это широкий географический подход в исследованиях: помимо положений гидрологии рек и океанологии было учтено влияние на устья рек метеорологических и ландшафтных факторов, а также местной хозяйственной деятельности.

Инициаторами изучения дельт в нашей стране были Б.А. Аполлов, В.Е. Ляхницкий, И.В. Самойлов. Особое развитие гидрологических исследований устьев рек получило в 1950–70-е гг. в Государственном океанографическом институте (ГОИН), Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ); сотрудниками ГОИНа и ААНИИ были созданы основы современной отечественной гидрологической школы в изучении устьев рек, проведены первые крупные послевоенные экспедиции в устьях рек, разработаны основы теории устьевых процессов и методов их изучения. В.Н. Михайловым в ГОИНе в 1971 г. издана одна из первых монографий по теории устьевых процессов [7]. В исследованиях устьев рек большой вклад внесли местные подразделения Гидрометслужбы, специализированные устьевые гидрометстанции и обсерватории. В конце 1970-х гг. к исследованию устьев рек подклю-

чились географический факультет МГУ и Институт водных проблем АН СССР (позже РАН).

Обзоры гидрологических исследований в устьях рек нашей страны приведены в [2, 3, 5–24]. Основные результаты этих исследований будут изложены в последних разделах статьи.

Цели статьи – рассмотреть современное состояние, проблемы и задачи гидрологии устьев рек как науки и описать основные результаты региональных и теоретических исследований устьев рек. При этом основное внимание будет уделено результатам отечественных исследований устьев рек и вкладу авторов статьи в эти исследования.

Объект гидрологии устьев рек, его определение, границы, части и типы

Устье реки как особый географический объект и его научное определение

Объектами гидрологии устьев рек как науки служат устьевые области рек (или устья рек как краткий синоним). Термин «устьевая область» в 1952 г. предложил И.В. Самойлов в книге «Устья рек», но определения ему не дал. Для устьевых областей (устьев рек) в отечественной научной литературе, включая работы авторов статьи, было дано много сходных по содержанию определений [2, 3, 5–12, 16, 17, 22–24]. Приведём одно их уточнённых авторами определений: Устьевая область реки (устье реки) – особый географический объект, охватывающий район впадения реки в приёмный водоём (океан, море, озеро), обладающий специфическим строением и экологическими условиями, переходным от речного к морскому (озерному) гидрологическим режимом и формирующийся под воздействием особых устьевых процессов – динамического взаимодействия и смешения вод реки и приёмного водоёма, отложения и переотложения речных и частично морских (озёрных) наносов, приводящих к образованию устьевого конуса выноса, а часто и дельты.

Исходя из изложенного, нельзя считать устьем всей реки место, где судоходный рукав дельты впадает в море и от которого ведут километраж (как часто делается в разного рода справочниках). Это место – лишь устье конкретного рукава, его устьевой створ.

Границы устья реки

Устье реки как область взаимодействия реки и моря (озера) обладает двумя особенностями: оно, во-первых, может занимать обшир-

ную площадь в береговой зоне суши и в прибрежной зоне моря (озера), а во-вторых, изменять своё географическое положение, форму, границы и размеры при крупномасштабных изменениях как уровня моря (озера), так и стока реки.

Поэтому при смещении границ устья реки в пространстве и во времени понятия «современное устье реки», «современная дельта» приобретают большую неопределённость. Например, многие считают «современными» дельты, начавшие формироваться в конце голоценовой трансгрессии Мирового океана, т.е. 7–9 тыс. лет назад. В Италии современной дельтой р. По (the modern Po delta) считают дельту, сформировавшуюся с 17 в., после дельты эпохи Возрождения (the Renaissance delta). Китайские специалисты называют современной дельту Хуанхэ, формирующуюся в зал. Бохайвань Жёлтого моря севернее Шаньдунского п-ова после прорыва сюда реки в 1855 г.

Предложения авторов статьи по решению упомянутых проблем следующие:

1. Географическое положение устья реки как протяжённого в пространстве природного объекта, его границы и размер зависят прежде всего от крупномасштабных изменений среднего (фонового) уровня приёмного водоёма. Так, морские устья рек при вековом или многолетнем повышении уровня моря (морской трансгрессии) подвергаются частичному или полному затоплению, зона взаимодействия реки и моря и верхняя (речная) и нижняя (морская) границы устья смещаются в сторону суши. В затопленной части старого устья на длительное время сохраняются отложения и формы рельефа существовавшей здесь ранее дельты. Во время понижения уровня моря (морской регрессии) зона взаимодействия вод реки и моря и границы устья смещаются в сторону моря, где начинают отлагаться речные наносы и формироваться новая дельта. В верхней части старого устья сохраняются отложения и формы рельефа ранее существовавшей здесь дельты. Таким образом, в каждый короткий интервал времени устье реки, где происходит взаимодействие вод реки и моря, может находиться в пределах очень протяжённой области реликтов (отложений и форм рельефа более древних устьев этой реки). В качестве примеров реликтов дельт, сформировавшихся при более высоком стоянии уровня приёмного водоёма можно привести отложения и формы рельефа старых дельт Волги, Урала, Терека

и Куры на суше на большом расстоянии от современного берега Каспийского моря. Примером дельт, существовавших при низком уровне Каспия, могут служить остатки объединённой дельты Волги, Урала и Терека на дне Каспийского моря [9, 23]. Следы древних дельт также обнаружены на дне океанов и морей вблизи современных устьев Дуная, Тибра, Янцзы и др.

2. Второй по значимости внешний фактор, влияющий на географическое положение, размеры и границы устьев рек, – это значительные естественные (климатически обусловленные) и антропогенные изменения стока воды и наносов рек [12, 15]. Известно, что в холодные и влажные многолетние периоды сток воды и наносов рек возрастает и что это сопровождается активным выдвиганием речных дельт в море. В жаркие и сухие многолетние периоды сток воды и наносов рек уменьшается, что ведёт к замедлению выдвигания дельт в море или даже к их размыву. Интересно, что в Европе при таких изменениях климата отмечалось почти синхронное выдвигание и отступление как речных дельт, так и ледников в Альпах.

Основные антропогенные изменения стока воды и наносов обусловлены регулированием режима рек в результате сооружения крупных водохранилищ. Поэтому уменьшение расхода воды реки в половодье и увеличение в межень, а также отложение наносов в водохранилищах неизбежно влияют на размеры зоны взаимодействия вод реки и моря и особенности развития дельт. Это позволяет считать современными как само устье, так и его режим только в период зарегулирования реки крупными водохранилищами или после значительного изъятия воды на хозяйственные нужды.

3. Даже в условиях относительной стабильности уровня моря и средних величин стока воды и наносов реки на границы зоны взаимодействия вод реки и моря в каждый момент времени существенное влияние оказывают отклонения гидрологических характеристик во время резких (экстремальных) паводков и половодья или штормовых нагонов от своих средних значений (нормы). Выделять границы устья реки при очень редких гидрологических событиях с практической точки зрения нецелесообразно, так как в этих случаях неоправданно увеличиваются размеры устья реки. Для ограничения предельного размера зоны взаимодействия вод реки и моря ранее

был предложен ряд сложных расчётных методов [5–8]. Авторы статьи считают возможным для такой цели применить более простой способ. В качестве верхней (речной) границы устья реки предложено принимать дальность распространения вверх по течению повышенный уровня воды либо при сизигийных приливах, либо при нагонах 10% обеспеченности (с повторяемостью 1 раз в 10 лет) при средних минимальных расходах воды в межень в период после зарегулирования стока реки. В качестве нижней (морской) границы устья реки предлагается принять внешний край зоны опреснения, выделенный по положению в поверхностном слое моря изогалины со значением, отличающимся на 10% от средней солёности вод моря в период средних максимальных расходов воды в половодье при зарегулированном режиме реки.

Таким образом, в настоящее время (конец второго десятилетия 21 в.) современными, по мнению авторов, следует считать само устье и его режим, сформировавшиеся в течение довольно непродолжительного периода времени: после зарегулирования реки и в условиях незначительных изменений уровня приёмного водоёма. Для слабо изменяющихся устьев рек такой период не должен превышать 30–50 лет, для быстро изменяющихся – быть ещё меньше.

Районирование устьев рек

Долгое время в отечественной литературе (в том числе в публикациях [5–7, 17, 22]), отдавалось предпочтение двухчленному принципу районирования устьев рек. В морском устье реки выделяли две крупные части: речную (устьевой участок реки, включая дельту, если она имела) и морскую (устьевое взморье, включая водоём эстуарного типа, если он имелся). Однако в результате детального изучения структуры и режима не только отечественных, но и большинства зарубежных устьев рек авторы статьи совместно с С.Л. Гориним [10, 11] разработали новые принципы районирования устьев рек. Предложено дельту (низменность в устье реки, рассечённую сложной и изменчивой гидрографической сетью) считать не частью реки, а особым географическим объектом, входящим самостоятельно в состав устья реки. Обоснования такого предложения: большая часть дельты – это суша, причём не целиком заливаемая речными водами; в дельте много озёр и болот, не связанных непосредственно с

рекой; для дельты характерен специфический ландшафт, существенно отличающийся от ландшафта обычных речных пойм. Аналогичное заключение касается и эстуарных водоемов в устье реки (полузакрытых водных объектов, в пределах которых речные воды смешиваются с морскими). Такие водоёмы часто настолько изолированы от моря, что признать их частью моря нельзя. Эстуарии могут входить в состав устья реки как особые самостоятельные объекты.

В итоге установлено, что в устье реки могут входить до четырёх частей (рис. 1): находящийся выше вершины дельты или эстуария и подверженный влиянию подпора со стороны моря, приливов и нагонов устьевой участок реки; дельта; эстуарий; подверженная опресняющему воздействию речного стока устьевая зона приёмного водоёма (в морских устьях – устьевое взморье). За пределами приведённых частей устья реки (с учётом критерия выделения их речной и морской границ, установленных выше) находятся приустьевой участок реки, куда в межень могут распространяться очень крупные нагонные волны, и предустьевое пространство моря, где в период очень крупного половодья может сказываться некоторое опресняющее влияние реки (рис. 1). Новые принципы районирования устьев рек уже применяются при описании устьев рек России [3].

Типизация устьев реки и их частей

В научной литературе есть много типизаций (классификаций) устьев рек и их частей (в том числе дельт и эстуариев); их анализ приведён в [1, 2, 4–12, 17, 20, 22, 24, 26–29, 32]. Авторы настоящей статьи отмечают большие противоречия в типизациях дельт, эстуариев и устьев рек в целом. Так, часто любые устья называют эстуариями, в одних случаях дельту считают одним из типов эстуария, в других – эстуарий считают одним из типов дельты. Ряд отечественных геоморфологов подразделяет все устья на два типа: дельты и эстуарии, хотя эти объекты – всего лишь части устья реки.

Предложения авторов по типизации отдельных частей устьев рек сводятся к следующему. Устьевые участки реки по морфологии можно подразделить на два типа: с широкими заливаемыми поймами и без пойм или с обвалованными поймами. По гидрологическому режиму эти участки делятся на три типа: с преобладанием

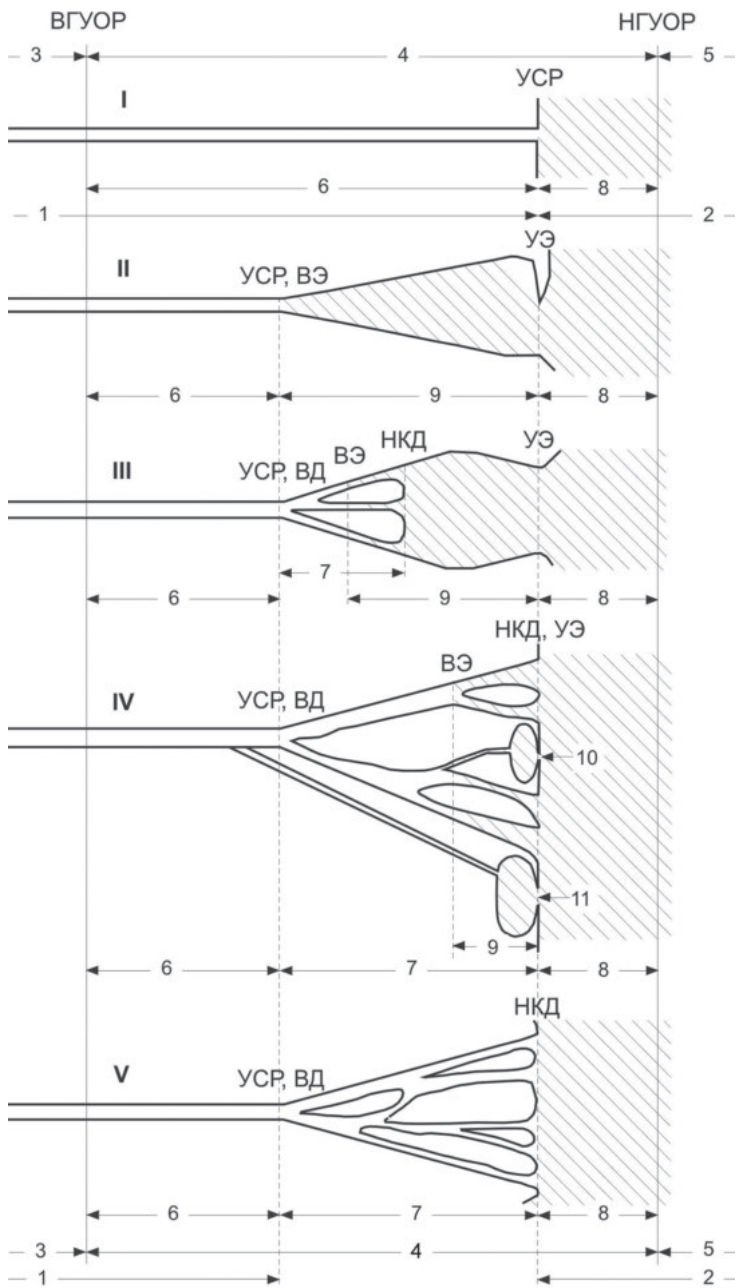


Рис. 1. Схема типизации и районирования устьевых областей рек (УОР).

Типы УОР: I – простая (П); II – эстуарная (Э); III – эстуарно-дельтовая (с дельтой выполнения) (ЭД); IV – дельтово-эстуарная (с дельтой выдвигения) (ДЭ); V – дельтовая (Д). 1 – река; 2 – приёмный водоём (океан, море, озеро); 3 – приустьевой участок реки; 4 – устьевая область реки (УОР); 5 – предустьевое пространство приёмного водоёма (океана, моря, озера); 6 – устьевой участок реки (УУР); 7 – дельта реки (ДР); 8 – устьевая зона приёмного водоёма (океана, моря, озера) (УЗПВ); 9 – эстуарий реки (ЭР); 10 – устьевая лагуна (дельтовая); 11 – устьевая лагуна (придельтовая); ВГУОР – верхняя граница УОР; НГУОР – нижняя граница УОР; Вд – вершина дельты; НКд – нижний край дельты (МКд – морской край дельты, ОКд – озерный, ЭКд – эстуарный); ВЭ – вершина эстуария; УЭ – устье эстуария; УСР – устьевой створ реки. Штриховкой выделена зона смешения водных масс реки и приёмного водоёма (океана, моря, озера)

влияния приливов; с преобладанием влияния нагонов; подвергшиеся влиянию подпора при подымавшемся уровне моря (озера).

Авторы статьи в своих исследованиях речных дельт придерживаются следующих принципов типизации этих объектов [6, 8, 10, 11, 16, 17, 19, 20]: все дельты подразделяются на два типа – дельты выполнения (заполнения), формирующиеся в верхних частях водоёмов эстуарного типа (лиманах, лагунах и др.), и дельты выдвигения, формирующиеся в прибрежной части приёмного водоёма. Кроме того, авторы подразделяют все дельты на непривлинные и приливные. При типизации непривлинных дельт выдвигения авторы статьи придерживаются предложений О.К. Леонтьева (1955) и подразделяют дельты по степени воздействия на них речного стока воды и наносов, с одной стороны, и морского волнения, с другой, и как следствие, по характеру морского края дельты (МКд). Выделено пять типов дельт: 1) лопастные с сильно изрезанным МКд; 2) лопастные со слабо изрезанным МКд; 3) дугообразные с изрезанным МКд; 4) дугообразные с выровненным МКд; 5) с прямолинейным МКд. В учебнике [6] эта типизация дельт выдвигения дополнена несколькими количественными параметрами по степени выдвигенности дельты в море и изрезанности МКд, а также количественным критерием соотношения воздействия на МКд реки (её стока наносов) и моря (энергии волнения).

Обзоры предложений по типизации эстуариев приведены в [4–6, 8, 10, 11, 26–30]. Поскольку эстуарии изучены в западных странах лучше, чем в России, авторы в основном придерживаются типизаций эстуариев, изложенных в [26–30]. По морфологии и происхождению эстуарии подразделяют на затопленные речные долины (лиманы, губы), лагуны, воронкообразные приливные эстуарии, фиорды. По величии

не приливов эстуарии, согласно [26, 28], можно подразделить на неприливно-ые (величина прилива $\Delta H_{\text{пр}} < 0,2$ м), микроприливно-ые ($\Delta H_{\text{пр}}$ от 0,2 до 2 м), мезоприливно-ые ($\Delta H_{\text{пр}}$ от 2 до 4 м), гиперприливно-ые ($\Delta H_{\text{пр}} > 4$ м). По степени вертикального перемешивания вод эстуарии делят на такие типы: с полным перемешиванием, с частичным перемешиванием, с клином осолонённых вод у дна, с узким слоем пресных вод у поверхности.

Устьевые зоны приёмных водоёмов (устьевые взморья) по рельефу дна подразделяют на приглубые (уклон дна $> 1\%$) и отмелье (уклон дна $< 1\%$); по преобладающей солёности воды S на пресные ($S < 1\%$), солоноватые (S от 1 до 24,7‰), солёные (S от 24,7 до 50‰), гиперсолёные ($S > 50\%$); по величине приливов – так же, как эстуарии.

Устьевые области рек (устья рек) авторы статьи подразделяют по географическому положению на океанические, морские, озёрные. По величине приливов – так же, как устьевые взморья или эстуарии. Более сложна типизация устьев рек по строению. Авторами в [8, 10–12] предложена новая типизация устьев рек (рис. 1). Устья рек подразделены на пять типов: I – простые (например, устья малых рек Черноморского побережья Кавказа); II – эстуарные бездельтовые (устья Мезени, Пенжины, Темзы); III – эстуарно-дельтовые с дельтой выполажнения (устья рек Оби, Енисея, Печоры, Днепра, Днестра); IV – дельтово-эстуарные, главный элемент которых – крупная дельта, имеющая либо лагуны вдоль МКД (устья Кубани, Сулака, Куры, Нила), либо эстуарные приливные расширения в устьях рукавов (устья Иравади, Амазонки, Ориноко); V – дельтовые без эстуарных водоемов (устье Волги).

Предмет гидрологии устьев рек. Устьевые процессы и влияющие на них факторы

Предмет гидрологии устьев рек как естественной науки – это не только устья конкретных рек как географические объекты и пространственно-временные изменения их гидрологического режима и строения, но и сложный комплекс процессов, называемых устьевыми, которые формируют эти объекты и их изменяют. Авторская классификация таких процессов приведена в [5, 6, 8, 16]. Устьевые процессы включают: физические процессы, создающие рассматриваемые объекты и определяющие их пространственно-временные изменения; химические процессы, формирующие химический

состав и качество вод в устьях рек; биохимические процессы, управляющие взаимодействием биоты и химического состава вод; биологические процессы, регулирующие развитие наземной, водной и околоводной биоты в устьях рек.

Главная роль в формировании устьев рек принадлежит физическим процессам [6, 8, 16]: динамике водного потока и водному балансу дельт; смешению речных и морских (озерных) вод; движению наносов и их балансу в устьях рек; морфологическим (эрозионно-аккумулятивные) процессам, включающим русловые деформации в водотоках, динамику МКД, изменения дна устьевого взморья. В.Н. Михайловым и М.М. Роговым в [17] эти процессы в совокупности названы гидролого-морфологическими. Позже этот термин получил признание в отечественной литературе по устьям рек [3, 16, 22–24]. Именно этим процессам будет уделено основное внимание при рассмотрении современного состояния гидрологии устьев рек и вклада в неё авторов статьи.

На гидролого-морфологические процессы в устьях рек влияет комплекс внешних и внутренних естественных и антропогенных факторов. Авторская типизация этих факторов с характеристикой их воздействия на процессы в устьях рек приведена в [3, 6, 8, 9, 13–18, 21, 23]. К внешним речным факторам относятся сток воды и наносов реки и его естественные (климатические) и антропогенные изменения. Внешние морские факторы включают изменения среднего уровня моря, приливы, нагоны, волнение. К внутренним (местным) антропогенным факторам можно отнести следующие: обвалование рукавов дельт; водозабор из устьевых водотоков и водоёмов на хозяйственные нужды; углубление, перекрытие, спрямление водотоков дельты и сооружение прорезей через устьевые бары для улучшения условий судоходства; мелиорация дельт (обводнение водоёмов, орошение или осушение земель); инженерные мероприятия по защите земель и населённых пунктов в дельте от затопления, а берегов водотоков или МКД от размыва и др.

Основные результаты региональных исследований устьев рек

Хотя устья крупных рек мира стали изучать давно, первые крупные исследования устьев конкретных рек с целью хозяйственного освоения их природных ресурсов были начаты лишь в 19 в.

В России к настоящему времени наиболее изученными оказались устья рек Волги, Терека, Сулака, Дона, Кубани, Невы, Северной Двины, Оби, Енисея и Лены. Обзоры результатов исследований устьев основных рек России приведены в [3, 9, 22–24]. За рубежом лучше всего изучены дельты рек Миссисипи, Колвилла, Маккензи, Меконга, Нила (обзоры даны в [25, 32]), эстуарии Сены, Темзы, Делауэра, Колумбии (обзоры приведены в [4, 28]).

Авторы статьи собрали, систематизировали и опубликовали в [6, 9, 12, 14, 19, 20, 23] современные количественные данные о главных факторах, влияющих на устья рек России и мира: стока воды и наносов, а также изменений уровня у берегов морей (с учётом просадки грунта).

Авторы принимали участие в полевых исследованиях устьев рек Волги, Терека, Сулака, Кубани, Енисея, Лены, Яны, Индигирки, а также устьев рек государств, ранее входивших в состав СССР, – Амударьи, Риони, Дуная, Днепра и Южного Буга. С участием авторов изданы крупные коллективные монографии по гидрологии устьев рек Волги (1998), Терека и Сулака (1993), устьев всех рек Каспийского региона (2013), Енисея (1991), Яны (1998), Индигирки (2001), Дуная (1963, 2004) и Кубани (2010).

Михайлова и Михайлов организовали подготовку по единой методике и издание аналитических обзорных работ по гидрологии устьев зарубежных рек, недостаточно известных в нашей стране. Были опубликованы (в основном в журнале «Водные ресурсы») отдельные статьи по устьям рек Риони, Дунай, По, Тибр, Рона, Эбро, Луара, Сена, Рейн и Маас, Темза, Эльба, Висла, Неман (Нямунас) (зарубежная Европа); Хуанхэ, Янцзы, Чжуцзян (Жемчужная), Хонгха (Красная), Меконг, Чаупхрая, Иравади, Ганг и Брахмапутра, Годавари, Шатт-эль-Араб, Инд (зарубежная Азия); Нил, Конго, Нигер, Сенегал, Гамбия, Замбези (Африка); Фрейзер, Колумбия, Колвилл, Маккензи, Св. Лаврентия, Делауэр, Саскуэханна и Потомак, Миссисипи (Северная Америка); Ориноко, Амазонка (Южная Америка). В этих публикациях помимо организаторов всего цикла работ приняли активное участие Е.Н. Долгополова, М.В. Исупова (ИВП РАН), Н.И. Алексеевский, Д.Б. Бабич, В.В. Иванов, В.Н. Коротаев, В.И. Кравцова, Д.В. Магрицкий, а также аспиранты и студенты кафедры гидрологии суши географического факультета (МГУ). В написании обзорных ста-

тей также участвовали специалисты из Грузии (Ш.В. Джаошвили), Украины (В.Н. Морозов и др.), Литвы (Р. Жаромскис), Италии (П. Беллотти и др.), Китая (Ц. Ли, Ш. Лю и др.).

Основные результаты теоретических исследований устьев рек

Динамика водного потока и водный режим

Сопряжение реки и приёмного водоёма при установившемся режиме. В 1950-е гг. в отечественной гидрологической литературе велась дискуссия о характере гидравлического сопряжения реки и приёмного водоёма. По одной версии, в связи с тем, что сезонные изменения уровня воды в водоёме невелики, а в реке могут быть очень большими, на нижнем участке реки всегда должна формироваться выпуклая кривая гидравлического спада; по другой версии, основанной на наблюдениях в устьях рек в межень, водоём всегда создает подпор во впадающей в него реке и здесь формируется вогнутая кривая гидравлического подпора.

Чтобы разобраться в этом вопросе, Михайловым в [7] были проведены детальные расчёты форм сопряжения водного потока (условной реки) с приёмным водоёмом (условным морем) в гипотетическом прямоугольном русле с постоянным уклоном дна с помощью строгого гидравлического метода Чарномского. На большом удалении от водоёма было задано ступенчатое изменение расхода воды Q_p , на нижнем конце русла, в его устьевом створе – ступенчатое изменение уровня приёмного водоёма H_m . На верхнем конце участка глубина потока (глубина равномерного режима, или «нормальная» глубина) зависит только от величины Q_p , задана графиком $h_0=f(Q_p)$ и может быть рассчитана по формуле Шези–Маннинга; в устьевом створе глубина русла h_y зависит только от H_m .

Расчёты показали следующее: равномерный режим на участке, когда средние скорости потока V , уклон водной поверхности I и глубина h вдоль потока неизменны, может быть лишь при условии $h_0=h_y$; если $h_0>h_y$, то на участке русла формируется выпуклая кривая гидравлического спада (V и I вдоль потока увеличиваются, h уменьшается); если $h_0<h_y$, то формируется вогнутая кривая гидравлического подпора (V и I вдоль потока уменьшаются, h увеличивается); при заданной величине H_m условие $h_0=h_y$ выполняется только при единс-

твенном расходе воды Q_p , а при заданной величине Q_p – только при единственной величине H_M ; уровни воды в разных пунктах участка (кроме его концов) выражены семейством кривых вида

$$H_i = \phi(Q_p, H_M). \quad (1)$$

Полученные в результате расчётов выводы применимы и к устьям рек в естественных условиях. Построенные в [7, 8] типовые графики связи между разными гидрологическими характеристиками в зоне переменного спада или подпора могут послужить образцами при обработке данных наблюдений в устьях рек.

В настоящее время, в условиях ускоряющегося повышения уровня Мирового океана и связанных с ним морей [12, 14, 15], актуальным становится расчёт и прогноз распространения в устья рек подпора со стороны моря. Для точного расчёта кривой свободной поверхности в реках при подпоре можно использовать, например, метод Н. Н. Павловского. Однако в многорукавных системах такой расчёт затруднён. Поэтому авторы статьи применяли простой эмпирический метод расчёта дальности подпора $L_{\text{под}}$ (км), используя формулу

$$L_{\text{под}} = k \Delta H_M / I, \quad (2)$$

где ΔH_M (м) – величина повышения уровня моря, I (‰) – уклон водной поверхности на участке в межень до начала повышения уровня моря. Применение формулы (2) для устьев рек Урала, Терека, Сулака и Куры в период повышения уровня Каспийского моря в 1978–95 гг. на 2,35 м дало правдоподобные результаты. Для всех перечисленных дельт повышение уровня воды на их морском крае $\Delta H_{\text{МКД}}$ совпадало с повышением уровня моря ΔH_M . Исключением стало устье Волги, где из-за наличия обширного мелководного взморья (так называемой буферной зоны) подъем уровня на МКД составил лишь 0,8 м, т.е. был намного меньше ΔH_M . Поэтому в формуле (2) для дельты Волги надо учитывать не ΔH_M , а $\Delta H_{\text{МКД}}$. Расчёты для всех устьев дали наилучшие результаты при $k=2,0$, что соответствует кривой подпора в виде части полуокружности.

При оценке влияния на устья рек изменений среднего уровня моря (фоновое, осредняющего сезонные, приливные, сгонно-нагонные колебания уровня моря) авторы учитывали, что реальное (фиксируемое на гидрологическом посту) многолетнее изменение уровня моря является относительным, так как становится алгебраическим

кой суммой эвстатического повышения или понижения уровня моря и величины просадки грунта, которая всегда сопровождается опусканием реперов и других устройств поста и, как следствие, «видимым» ростом уровня моря на этом посту в береговой зоне. В дельтах рек просадка грунта может быть вызвана естественным уплотнением и обезвоживанием влажных и рыхлых отложений, а также антропогенными факторами – откачкой нефти, газа, пресных подземных вод. Если эвстатическое повышение уровня Мирового океана и связанных с ним морей в настоящее время составляет 3–4 мм/год, то вследствие только просадки грунта рост уровня может достигать 5–20 мм/год [12, 14, 31].

Сопряжение реки и приёмного водоёма при неустановившемся режиме. Для приближённой оценки дальности распространения приливов в реки и рукава дельт $L_{пр}$ авторы статьи используют известную формулу В.Е. Ляхницкого, сходную по структуре с формулой (2) и имеющую вид $L_{пр} = kA/I_{ст}$, где A – амплитуда прилива в устьевом створе, $I_{ст}$ – средний уклон водной поверхности в русле за приливный цикл, k – коэффициент, равный 1 или 1,5.

Для расчёта нагонных колебаний уровня воды в реке или рукавах дельт Михайловым разработан [6–8] и проверен на примере устьев Дона и Дуная специальный метод, основанный на экспоненциальном законе затухания волн нагонов в устьях рек. Расчётная формула следующая:

$$\Delta H_{нг,x} / \Delta H_{нг,0} = \exp(-kx), \quad (3)$$

где $\Delta H_{нг,x}$ – высота нагона (м) над предшествующим уровнем воды на расстоянии x от устьевого створа (км), $\Delta H_{нг,0}$ – то же в устьевом створе, k – декремент затухания нагона, равный $k = aQ + b$, где Q – расход воды до начала нагона. Из формулы (3) после её логарифмирования можно получить выражение для дальности распространения нагона в км: $L_{нг} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{\Delta H_{нг,0}}{0,05} \right)$; здесь 0,05 – минимальное повышение уровня (м), которое можно надёжно измерить.

Михайловым впервые проведено совместное исследование на экстремумы уравнений движения, неразрывности и транспортирующей способности водного потока для приливного цикла в устье реки [6, 8]. В частности, математически доказано, что поворот течения с прямого (отливного) на обратное (приливное) происходит

немного позже малой воды (наступления минимального уровня в отливную фазу), а поворот течения с приливного на отливное – немного позже полной воды (максимального уровня в приливную фазу); максимальные скорости прямых течений наблюдаются приблизительно в середине периода падения уровня, а максимальные обратные – в середине периода роста уровня; наибольшая мутность воды отмечается в течение приливного цикла дважды, немного опережая экстремумы скоростей течения. В результате проведённого анализа построены типовые петлеобразные графики связи между взятыми попарно гидрологическими характеристиками [6, 8]; эти графики могут помочь при обработке данных измерений. Итоги анализа подтверждены результатами наблюдений в приливных устьях рек Северной Двины, Мезени, Темзы и Меконга.

Распределение стока воды по рукавам дельт. В конце 1960-х гг. сначала К.В. Гришаниным, а позже Ивановым были предложены два схожих итерационных гидравлических метода расчёта распределения расходов воды по рукавам дельт. Вместо этих сложных методов авторы статьи в своих расчётах отдали предпочтение разработанному одним из них и изложенному в [6, 8, 13, 16, 17] более простому аналитическому способе расчёта, названного методом общих (суммарных) модулей сопротивления, рассчитываемых по особым правилам отдельно для последовательного, параллельного и последовательно-параллельного соединения участков русловой сети дельты. Предложенный метод пригоден для расчёта распределения расходов воды в прогрессивно дробящейся сети водотоков любой сложности. Он базируется на трех допущениях: полного водного баланса в русловой сети всей дельты и в отдельных ее узлах; равенства падения уровня Δz по любому направлению от вершины дельты до моря; квазиравномерного движения воды в водотоках дельты, описываемого уравнением $\Delta z = FQ^2$, где F – модуль гидравлического сопротивления водотока, не зависящий, согласно постулату Павловского, ни от Δz , ни от Q . Модуль сопротивления рассчитывается по уравнению $F = Ln^2/B^2h^{10/3}$, вытекающему из формулы Шези–Маннинга; здесь L , B , h – соответственно длина участка русла, его средняя ширина, средняя глубина, n – коэффициент шероховатости. Например,

для простой двухрукавной дельты имеем

$$Q_1 / Q_2 = \sqrt{F_2 / F_1} Q_1 + Q_2 = Q_0.$$

При заданной величине расхода воды реки выше вершины дельты Q_0 в любом узле разветвления расход воды будет больше в том рукаве, ширина и глубина которого больше, а длина и шероховатость меньше, чем в смежном. Применение авторами этого метода расчёта распределение расходов воды по рукавам гипотетической дельты [13, 16] и дельт Куры, Дуная и др. подтвердило следующий важный вывод. Руслевая сеть любой дельты – это единая система взаимосвязанных морфологически и гидравлически элементов. Естественное или антропогенное изменение размера русла и шероховатости дна любого водотока в этой системе неизбежно должно привести не только к изменению доли водного стока в этом водотоке и ниже его по течению, но и в смежных водотоках, а также распространиться вверх по течению вплоть до вершины дельты и даже в совсем другую её часть. Такая особенность дельт часто не учитывается при осуществлении инженерных мероприятий в этих объектах.

Водный баланс дельт. Долгое время считалось, что все дельты из-за испарения воды теряют часть водного стока реки. Наблюдения в дельтах Волги, Терека, Урала, Дуная, Или, Инда, Нила подтверждали такое мнение. Однако более детальные исследования в других дельтах показали, что роль дельт в изменении среднемноголетнего водного стока рек более сложная (обзор проблемы дан в [6, 8]). В дельтах как аazonальных географических объектах увлажнение создаётся не столько местными осадками P , сколько водным стоком самой реки. Поэтому реальное испарение с поверхности дельты значительно больше зональной величины испарения и приблизительно равно зональной величине испаряемости E_0 . С наиболее сухих частей дельты испарение меньше E_0 , с поверхности водотоков и водоёмов – равно E_0 , с болот, плавней, заросших водоёмов из-за большой роли транспирации – больше E_0 . В итоге изменение среднемноголетнего стока воды реки в пределах дельты ΔW_Q (км³/год) зависит от соотношения P и E_0 :

$$\Delta W_Q = (P - E_0) F_A \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где P и E_0 в мм/год, площадь дельты F_A в км².

Проведённые авторами расчёты для многих дельт мира [6, 8, 13, 16] показали, что в областях избыточного увлажнения (здесь индекс сухости, по М.И. Будыко, $E_0/P < 0.4$) и в областях достаточного увлажнения (E_0/P от 0.4 до 1.0) водный баланс дельт положительный и в их пре-

делах происходит добавление водного стока, а в областях недостаточного увлажнения (E_0/P от 1.0 до 3.0) и сухих ($E_0/P > 3.0$) водный баланс дельт отрицательный и в их пределах происходит потеря водного стока. Укажем дельты, где добавление водного стока наибольшее – Амазонки, Ганга и Брахмапутры, Нигера, Меконга, Иравади, Красной.

Динамика речной струи на устьевом взморье. В работах [5, 6] было доказано теоретически и подтверждено данными наблюдений, что на открытом, приглубом и непреливном устьевом взморье средняя скорость течения в инерционной струе, вытекающей из реки или рукава дельты затухает в сторону моря по экспоненциальному закону

$$V_x/V_0 = \exp(-kx/h_0). \quad (5)$$

Здесь V_0 – скорость течения в начальном створе струи, где глубина равна h_0 , V_x – скорость течения на расстоянии x (м) вдоль струи, k – декремент затухания, изменяющийся в узких пределах от 0,0020 до 0,0030.

Влияние на водный режим дельт местных водохозяйственных и гидротехнических мероприятий. В работе [13] авторы систематизировали сведения о закономерностях воздействия инженерных мероприятий в дельтах на их гидрологический режим и рассмотрели некоторые методы расчёта этого воздействия: способы расчета влияния двустороннего обвалования рукавов на повышения в них уровня воды; приёмы оценки противоречивого воздействия крупных водозаборов и вододелителей на режим дельт; методы прогноза воздействия на режим дельт мероприятий по улучшению условий судоходства (углубления рукавов и их устьевых баров, спрямления и перекрытия рукавов и др.); приёмы оценки влияния на водный баланс дельт их осушения или обводнения и др.

Смешение речных и морских вод

Устьевая зона смешения. В морских устьях рек взаимодействуют две существенно различающиеся по физическим, химическим и гидробиологическим свойствам первичные водные массы – речная и морская. В районе этого взаимодействия формируется так называемая устьевая зона смешения. В устьях крупных рек эта зона может занимать обширные площади, например, зона опреснения в

устье Амазонки распространяется в океан на расстояние до 900 км. Строгая теория зоны смешения пока не создана. Авторы статьи, однако, высказали ряд предложений, касающихся структуры и режима этой зоны [6, 8, 14, 21]. Предложено считать внутренней границей устьевой зоны смешения изогалину 1‰ у дна, а внешней – изогалину в поверхностном слое, значение которой составляет 90% средней солёности вод данного моря. В пределах зоны смешения можно выделить фронтальную подзону (область максимальных продольных градиентов солёности воды), а внутри этой подзоны – вертикальную поверхность – геометрическое место экстремальных продольных градиентов солёности воды (фронтальный раздел). Проекция этого раздела на поверхность моря – это гидрофронт. В период половодья на реке, в отливную фазу, при сгонах эти границы смещаются в сторону моря, в период межени, в приливную фазу, при нагонах – в сторону суши (при этом зона смешения может распространяться в русло реки или рукава дельты).

Процесс возрастания солёности воды вдоль зоны смешения от устьевого створа в сторону моря модно объяснить, исходя из закономерностей затухания скорости течения в речной струе на взморье (см. формулу (5)). На боковых и нижней гранях речной струи во фрикционное движение вовлекаются смежные морские воды. Вследствие этого расход смешанных речных и морских вод вдоль струи возрастает. На этот парадоксальный факт впервые обратил внимание адмирал О.С. Макаров в своём труде «Витязь и Тихий океан» (1894), написав, что река приводит в движение такое количество морской воды, которое в сто и более раз превосходит сток самой реки.

Согласно расчётам и данным измерений в полевых условиях и в экспериментальных лотках [5, 6], нарастание расхода смешанных вод в сторону водоёма происходит почти зеркально (хотя и медленнее) по сравнению с уменьшением скорости течения (формула (5)). Аналогично возрастает вдоль зоны смешения солёность воды.

Вертикальное перемешивание вод в устьях рек. При исследовании стратификации и вертикального перемешивания вод [5–8, 10, 11, 14, 16, 21] авторы статьи придерживались подходов, разработанных для устьев рек в Западной Европе и США [4, 26, 28–30]. В качестве формального показателя степени стратификации и вертикального

перемешивания вод в устьях рек используют так называемый параметр стратификации n , равный $\Delta S/S_{\text{ср}}$, где $\Delta S = S_{\text{дно}} - S_{\text{пов}}$, $S_{\text{ср}} = 0.5(S_{\text{дно}} + S_{\text{пов}})$, $S_{\text{дно}}$ и $S_{\text{пов}}$ – солёность воды у дна и на поверхности. Выделяют три основных типа стратификации и перемешивания вод: I. Слабая стратификация и полное (хорошее) перемешивание (n от 0 до 0,1); II. Умеренная стратификация и частичное перемешивание (n от 0,1 до 1,0); III. Сильная стратификация (n от 1,0 до 2,0) и либо клин осолонённых вод у дна, либо тонкий слой пресной воды у поверхности, как во многих фиордах. Согласно [26, 28], на характер вертикального перемешивания заметное влияние оказывают внешние факторы: на ослабление перемешивания (сдвиг его типа к III) влияет увеличение водного стока реки, на активизацию перемешивания (сдвиг в сторону типа I) – усиление воздействия приливов и волнения.

Михайлова в работе [21] на основе опубликованных в зарубежной литературе данных наблюдений за изменением поля солёности в устьях Роны, По, Тибра, Фрейзера, Колумбии в целом подтвердила сделанные ранее выводы и частично уточнила их. В частности, в [21] показано, что при сизигийных приливах вертикальное перемешивание вод сильнее, а стратификация вод слабее, чем в квадратуру.

Помимо параметра n в качестве показателей процесса смешения вод по вертикали применяют приливный параметр Симмонса $\alpha = W_Q/P_t$, где W_Q – объём стока воды реки за приливный цикл, P_t – объём приливной призмы, а также ряд гидрофизических критериев. Среди них: плотностное число Фруда

$$F_{1\rho} = V / \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{ср}}} gh}, \quad (6)$$

где V – средняя скорость речного потока, h – глубина русла, $\Delta\rho$ – разность плотностей морской ρ_m и речной ρ_p воды, $\rho_{\text{ср}} = 0,5(\rho_m + \rho_p)$; эстуарное число Ричардсона; слоевое число Ричардсона и др. Сводка количественных значений перечисленных показателей, параметров и критерия для разных типов вертикального перемешивания приведены в [5, 6, 8].

Проникновение морских вод в реки и рукава дельт. В условиях антропогенного сокращения водного стока многих рек и ускоряющегося повышения уровня океанов и морей актуальным становится исследование процессов проникновения в устья рек осолонённых вод и разработка мер борьбы с этим негативным событием. Михай-

лова провела анализ этих процессов на примере дельт Яны, Индигирки, Дуная, Тибра, Роны, По, Луары, Меконга, Колвилла, Ориноко. При этом использованы два метода анализа и расчёта [16, 21]: 1) эмпирический, заключающийся в построении по данным наблюдений, во-первых, продольных профилей солёности воды в разные фазы водного режима реки и прилива, а во-вторых, графиков зависимости между дальностью проникновения осолонённых вод L_S и расходом воды реки (рукава) $L_S = aQ^{-m}$ или $L_S = b(Q_{кр} - Q)^n$, где $Q_{кр}$ – расход воды, при котором начинается проникновение морских вод; 2) полутеоретический, использующий формулу Кейлегана

$$L_S/h = cFr_p^{-p}, \quad (7)$$

где Fr_p – плотностное число Фруда по формуле (6). Структура формулы (7) указывает на то, что дальность проникновения осолонённых вод в устья рек должна увеличиваться при уменьшении скорости течения в речном потоке и увеличении глубины как в результате искусственного углубления русла или устьевого бара, так и повышения уровня моря. Значения эмпирических параметров во всех приведённых выше формулах подбираются по данным наблюдений. В [21] приведены сведения о величинах L_S и $Q_{кр}$ в устьях ряда отечественных и зарубежных рек.

Морфологические процессы

Процессы дельтоформирования. В последние десятилетия в нашей стране в изучении процессов формирования речных дельт получены существенные результаты [2, 3, 5–9, 13–20, 22–24]; в этих исследованиях активное участие принимали и авторы статьи. Ими получены следующие основные результаты:

1. Предложено подразделение процессов дельтоформирования на части, отличающиеся характером процесса и его продолжительностью: эпохи дельтоформирования, соответствующие крупным морским регрессиям, завершающим этапам трансгрессий и периодам относительной стабилизации уровня морей; стадии формирования сначала дельты выполнения, а затем дельты выдвижения в периоды замедления повышения уровня моря и его стабилизации; фазы малорукавной, многорукавной и вновь малорукавной дельты во время обеих стадий [6, 8, 14]. Выделены также два типа дельтоформирования: медленного эволюционного, заключающегося в чередующемся выдвижении в море крупных дельтовых лопастей (как в

дельтах Волги, Лены, По, Роны и др.) и быстрого, скачкообразного, с прорывами и полной перестройкой гидрографической сети дельты. Процессы второго типа включают несколько этапов [6, 8, 17, 19, 23, 24]. Такие процессы до антропогенного сокращения стока наносов рек происходили в очень изменчивых дельтах Амударьи, Или, Куры, Сулака [9, 23, 24], а также Хуанхэ, Миссисипи, Годавари. В настоящее время развитие дельты с прорывами может случиться только в устье Терека [23].

2. Михайловой выявлены особенности морфометрии дельт выполнения и выдвижения [19, 20], заключающиеся в различиях связей между разными характеристиками дельт обоих типов. В [20] приведена сводка морфометрических характеристик 16 дельт выполнения и 42 дельт выдвижения в устьях рек России и зарубежных стран. В [19] опубликованы сведения о многолетних изменениях многих дельт выдвижения.

3. Разработан балансовый подход в изучении изменений дельт выдвижения [6, 18]. Предложено, в частности, приближённое уравнение баланса наносов в объёмных единицах за интервал времени Δt (в годах) в условиях относительно стабильного уровня моря

$$\Delta V_{\text{кв}} = \Delta L_{\text{д}} h_{\text{взм}} B_{\text{мкд}} = k W_{\text{Р}} \Delta t / \rho_{\text{отл}} - V_{\text{в}} \quad (8)$$

где $\Delta V_{\text{кв}}$, $\Delta L_{\text{д}}$ – изменения объёма устьевых конусов выноса и длины дельты за период Δt , $h_{\text{взм}}$ – глубина взморья, $B_{\text{мкд}}$ – длина МКД, $W_{\text{Р}}$ – сток наносов реки в млн т/год, $\rho_{\text{отл}}$ – плотность дельтовых отложений, k – доля дельтоформирующих наносов в величине $W_{\text{Р}}$ (обычно от 0,3 до 0,5), $V_{\text{в}}$ – объём наносов, уносимых волнением за пределы устья реки.

На основе рассматриваемого подхода и уравнения (8) разработан приближённый метод расчета «критического» стока наносов реки $W_{\text{Р, кр}}$ при котором дельта перестаёт выдвигаться в море и тенденция ее развития сменяется на отступление и деградацию. Из компонентов уравнения (8) измерить можно лишь морфометрические характеристики и величину $W_{\text{Р}}$. Поэтому выражение (8) необходимо привести к эмпирической формуле, рассчитываемой аналитически или графически для каждой конкретной дельты $\Delta L_{\text{д}}/\Delta t = a W_{\text{Р}} - b$, откуда при условии $\Delta L_{\text{д}}/\Delta t = 0$ можно рассчитать «критическое» значение $W_{\text{Р}} = b/a$. Метод применён авторами к дельтам Нила, Годавари, Дуная и Хуанхэ. Для первых двух стоков наносов рек стал меньше «критичес-

кого» ещё в середине 20 в. после сооружения на реках крупных водохранилищ, а для двух последних – антропогенное уменьшение W_R и выход дельт на большие морские глубины приблизил их к началу размыва и деградации.

4. Разработан метод оценки степени затопления дельты при значительном повышении уровня моря и антропогенном сокращении стока наносов реки [14, 16, 18]. Метод основан на предложенной Михайловой [18] концепции подпорной призмы, возникающей в приморской зоне дельты в результате повышения уровня моря на ΔH_M . Объём этой призмы равен

$$V_{\text{пп}} = 0,5 \Delta H_M^2 B_{\text{мкд}} / i_d \quad (9)$$

где i_d – уклон поверхности приморской зоны дельты. Степень затопления дельты будет зависеть от соотношения объёмов $V_{\text{пп}}$ и стока дельтоформирующих наносов $\Sigma k W_R / \rho_{\text{отл}}$ за период подъёма уровня моря. Если $V_{\text{пп}}$ больше стока наносов, то часть дельты (как в устьях Урала, Сулака, Куры в период повышения уровня Каспийского моря на 2,35 м в 1978–95 гг.) будет затоплена, а площадь всей дельты уменьшится [23]. Если же сток наносов больше $V_{\text{пп}}$, то дельта будет наращиваться в высоту и медленно выдвигаться в море, несмотря на рост его уровня (как в устье рукава Каргалинский Прорыв в дельте Терека [23]).

Русловые процессы в рукавах дельт. С целью изучения русловых процессов и динамики изменчивой русловой сети дельт авторы [6, 16] разработали концепцию динамически устойчивого русла рукавов дельт. Суть концепции состоит в следующем. Предполагается, что в результате взаимного приспособления потока и русла эрозионно-аккумулятивные процессы стремятся сформировать динамически устойчивое русло, в котором направленные (необратимые) деформации не происходят, а возможны лишь знакопеременные (обратимые) изменения (например смещение донных гряд). На основе обработки обширного материала измерений в неприливных дельтах Енисея, Печоры, Оби, Лены, Волги, Дуная, Кубани, Куры, Терека, Амударьи получены связи вида

$$B_0 = K_B Q_\Phi^{1/2}, h_0 = K_h Q_\Phi^{1/3}, V_0 = K_V Q_\Phi^{1/6}, I_0 = K_I Q_\Phi^{-1/6}, \quad (10)$$

где B_0 , h_0 , V_0 и I_0 – мало изменяющиеся, т.е. условно устойчивые величины ширины, средней глубины русла, средней скорости течения,

уклона водной поверхности рукавов при руслоформирующих расходах воды в рукавах $Q_{\text{ф}}$, соответствующих среднему максимальному расходу воды реки в вершине дельты в период половодья. Структура формул (10) получена теоретически, а коэффициенты K найдены путём обработки данных измерений и оказались индивидуальными для каждой из упомянутых дельт и зависящими от концентрации наносов в реке в период половодья (чем она больше, тем K_B и K_h меньше, а K_V и K_I – больше [6]).

Формулы (10) названы гидролого-морфометрическими зависимостями; они были применены авторами для оценки тенденции развития рукавов в конкретных дельтах. Эта оценка строилась на сравнении фактических характеристик рукавов B , h , V и I с их устойчивыми значениями согласно формулам (10). Признаками тенденции рукава как активизации (размыву) служат соотношения $B < B_0$, $h < h_0$, $B/h < B_0/h_0$, $V > V_0$ и $I > I_0$; соотношения с противоположными знаками – признаки потерь рукавом активности и тенденции к заилению и отмиранию [6, 16].

Авторами статьи [6, 14, 16, 18, 23] предложены четыре типовые схемы (рис. 2) русловых деформаций в отдельных дельтовых рукавах при неизменном уровне моря, при его повышении и при его понижении в условиях как приглубого, так и очень отмелого взморья.

Русловые процессы в многорукавных системах дельт значительно сложнее. В таких случаях приходится рассматривать не только изменения морфометрических характеристик рукавов, но и сопутствующее им перераспределение стока по рукавам. Наиболее частый случай следующий: стремясь к достижению устойчивого состояния, русло с увеличивающимся расходом воды начинает размываться. Это ведёт к уменьшению его гидравлического сопротивления и дальнейшему увеличению расхода воды. Смежный рукав, наоборот, теряет свой сток и начинает заливаться. В результате начавший активизироваться рукав продолжает размываться, а уменьшивший свой сток – заливаться. Этот процесс продолжается до полного переключения стока в первый рукав и отмирания второго. Интенсивность этого процесса тем больше, чем больше сток наносов реки. Согласно сказанному, многорукавные системы в дельтах, особенно активно развивающихся, обычно недолговечны. В очень редких слу-

чаях возможно временное («конкурирующее») развитие смежных рукавов.

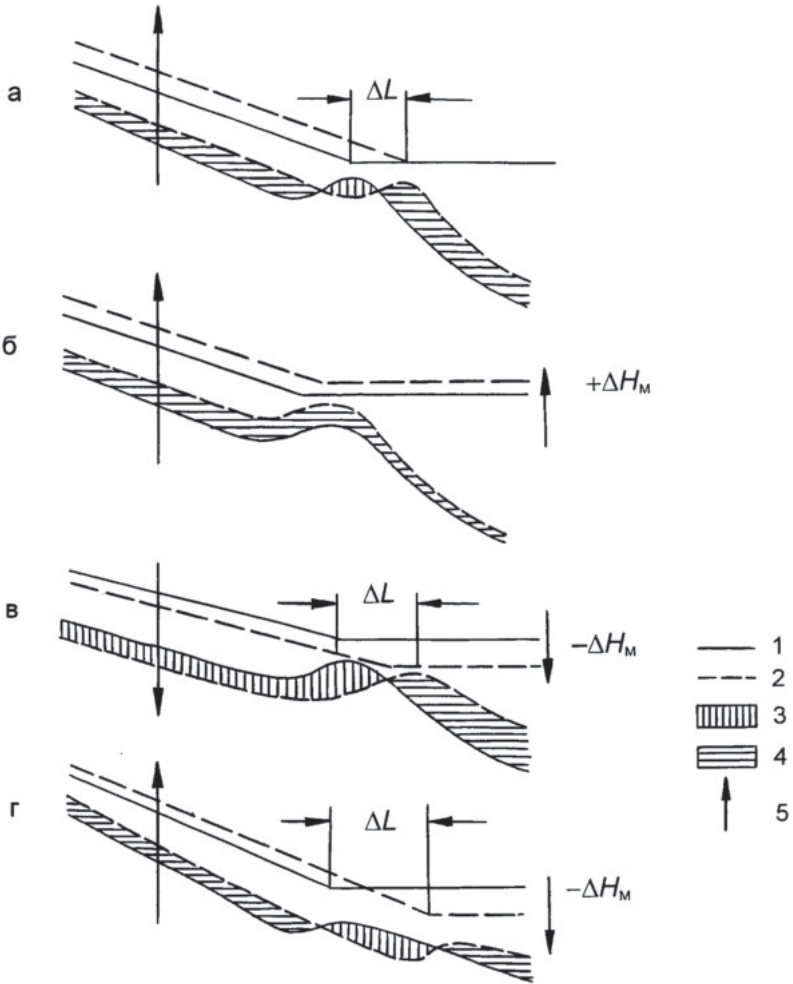


Рис. 2. Схема необратимых русловых деформаций в рукавах дельты в результате: устьевого удлинения при стабильном уровне моря (а), повышения уровня моря (б), понижения уровня моря в случае приглубого взморья (в), понижения уровня моря в случае очень отдаленного взморья (г). 1 и 2 – начальное и конечное положение устьевой поверхности и дна, 3 – размыв, 4 – аккумуляция наносов, 5 – направленность изменения уровня воды и отметок дна, ΔL – величина устьевого удлинения русла

Заключение: современные проблемы и задачи гидрологии устьев рек

В последние полвека гидрология устьев рек как наука добилась крупных научных и практических результатов; в Европе и США – в основном при изучении эстуариев, в нашей стране – дельт. Несмотря на эти достижения, требования к гидрологии устьев рек возрастают. Объясняется это тем, что 1) устья рек, особенно в современных условиях, – одни из самых изменчивых и экологически уязвимых географических объектов; 2) хозяйственное освоение их богатых природных ресурсов постоянно расширяется, что нуждается в его научном обосновании. Кроме того, требует решения ряд проблем, возникающих при одновременном использовании водных, земельных, биологических и других ресурсов устья реки разными отраслями хозяйства. К таким проблемам относятся, например, противоречия между водным транспортом, коммунальным хозяйством, нефтегазовым комплексом, с одной стороны, и требованиями охраны природы, с другой; между сельским и рыбным хозяйством; между потребностями сельского хозяйства в многоводный период (защита от наводнений) и во время засухи (необходимость в большом водозаборе для орошения земель).

К наиболее актуальным задачам современной гидрологии устьев рек следует отнести следующие:

1. Разработка прогноза возможных в 21 в. изменений строения, режима и экологических условий устьев рек под воздействием ожидаемых естественных и антропогенных изменений стока воды и наносов рек и повышения уровня Мирового океана и связанных с ним морей. Одной из наиболее важных задач становится прогноз затопления и деградации дельт в результате повышения уровня моря и антропогенного сокращения стока наносов рек.

2. Разработка комплекса усовершенствованных методов анализа, расчёта и прогноза гидрологических характеристик устьев рек. Важной частью такого комплекса методов должна стать гидролого-морфологическая математическая модель развития русловой сети дельты, одновременно учитывающая взаимовлияющие русловые процессы в рукавах и перераспределение стока между ними.

3. Исследование воздействия на устья рек опасных гидрологических событий (в частности, наводнений как речного, так и морского происхождения).

4. Разработка комплекса универсальных научных рекомендаций по рациональному использованию и охране природных ресурсов устьев рек. В частности, должны быть разработаны рекомендации по преодолению противоречий в требованиях различных отраслей хозяйства. Одним из возможных компромиссов может стать принцип «зонирования» устьев рек, т.е. разделение их площади под нужды разных потребителей.

При дальнейшем изучении устьев рек России (помимо решения перечисленных выше общенаучных задач) необходимо уделить особое внимание следующему: 1) более широкому внедрению постоянно действующего мониторинга гидрологического и экологического состояния устьев важнейших рек страны с применением усовершенствованных приборов и наземных и дистанционных методов; 2) расширению исследований в устьях рек Российской Арктики, в первую очередь их ледового режима, в связи с потеплением климата; 3) дальнейшему изучению изменения строения и режима устьев рек, впадающих в Каспийское море в условиях начавшегося в конце 20 в. нового понижения его уровня; 4) изучению ещё недостаточно исследованных приливных эстуариев в устьях рек страны, в особенности на примере эстуариев на Камчатке и в Приморье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дельты – модели для изучения / Пер. с англ. под ред. Р.Б. Сейфул-Мулюкова. М.: Недра, 1971. 323 с.

2. Коротаяев В.Н. Очерки по геоморфологии устьевых и береговых систем. Избранные труды. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 493 с.

3. Кравцова В.И., Митькиных Н.С. Устья рек России. *Атлас космических снимков* / Под ред. В.Н. Михайлова. М.: *Научный мир*, 2013. 122 с.

4. Мак-Дуэалл Д.М., О'Коннор Б.А. Гидравлика приливных устьев рек / Пер. с англ. // под ред. В.Н. Михайлова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

5. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 175 с.

6. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. Учебник. М.: Изд-во Московского ун-та, 1998. 176 с.

7. Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в неприливных устьях рек. М.: Гидрометеиздат, 1971. 259 с.

8. Михайлов В.Н. Закономерности устьевых процессов // Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. С. 609–686.

9. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.

10. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. Том 39, №3, 2012. С. 243–257.

11. Михайлов В.Н., Горин С.Л., Михайлова М.В. Новый подход к определению и типизации эстуариев // Вестник Московского университета. Серия 5: География. №5, 2009. С. 3–11.

12. Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология. Учебник. М.: Директ-Медиа, 2017. 751 с.

13. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние местных водохозяйственных и гидротехнических мероприятий на речные дельты // Водные ресурсы. Том 42, №3, 2015. С. 249–259.

14. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Водные ресурсы. Том 42, №4, 2015. С. 367–379.

15. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Дельты как индикаторы естественных и антропогенных изменений режима рек и морей // Водные ресурсы. Том 30, №6, 2003. С. 655–666.

16. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Физические основы гидрологических и морфологических процессов в речных дельтах // Вестник РФФИ. №2 (78), 2013. С. 26–33.

17. Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.

18. Михайлова М.В. Баланс наносов в устьях рек и формирование дельт при повышении и понижении уровня моря // Водные ресурсы. Том 33, №5, 2006. С. 567–579.

19. Михайлова М.В. Многолетние изменения строения речных дельт // Водные ресурсы. Том 43, №5, 2016. С. 488–501.

20. Михайлова М.В. Морфометрия речных дельт // Водные ресурсы. Том 42, №1, 2015. С. 45–55.

21. Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Водные ресурсы. Том 40, №5, 2013. С. 439–455.

22. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчёта (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 383 с.

23. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления / Под ред. В.Н. Михайлова. М.: ГЕОС, 2013. 702 с.

24. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития / Под ред. В. Н. Коротаева, В.Н. Михайлова, Д.Б. Бабича, Ц. Ли, Ш. Лю. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.

25. Coleman J.M, Huh O.K. Major world deltas. A perspective from space <http://www.geol.lsu.edu/WDD/PUBLICATIONS/C&Hnasa04/C&Hfinal04.htm>

26. Dyer K.R. Estuaries. A physical introduction. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 195 p.

27. Geomorphology and sedimentology of estuaries // Ed. by G.M.E. Perillo. Amsterdam: Elsevier Science BV, 1996. 471 p.

28. Officer Ch.B. Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters). New York: John Wiley and Sons, Inc., 1976. 465 p.

29. Prandle D. Estuaries: Dynamics, mixing, sedimentation and morphology. New York: Cambridge University Press, 2009. 238 p.

30. Savenije H.H. Salinity and tides in alluvial estuaries. Amsterdam: Elsevier, 2005. 197 p.

31. Syvitski P.M., Kettner A.J., Overeem I., Hutton E.W.H. Hannon M.T., Brakenridge G.R., Day J., Vitzthum C.J., Saito Y., Giosan L., Nicholls R.J. Sinking deltas // http://darchive.mblwhoilibrary.org/bitstream/handle/1912/3207/SyvitskiDeltas_Paper.pdf?sequence=1

32. Wright L.D. River deltas // Coastal Sedimentary Environments // Ed by R.A. Davis Jr. *New York*, Springer-Verlag, 1978. P. 5–68.

Использование данных дистанционного зондирования для гидрологических исследований в ИВП РАН: ретроспектива и современные достижения

Е.Л. Музылёв, И.Е. Курбатова

Развитие исследований с начала 1970-х до 1990-х годов¹

Впервые в отечественной практике концептуальные положения по использованию данных космической съёмки для расчётов и прогнозов речного стока были сформулированы в работе Г.П. Калинина [7], выполненной им в Институте водных проблем АН СССР. Автором были намечены пути решения задач по использованию этих данных для анализа гидрологических процессов, в том числе формирования стока, очерчены перспективы такого использования, отмечены отображавшиеся на снимках особенности подстилающей поверхности, количественные характеристики которых могли бы использоваться в прогностических моделях. Предложенные Калининым подходы были реализованы в ИВП АН СССР Ю.В. Куриловой и П.А. Колосовым [8] при оценках характеристик речного стока с использованием спутниковых данных о динамике снеготаяния.

С конца 1970-х и в 1980-е гг. в ИВП АН СССР начались широкие исследования возможностей использования данных дистанционного зондирования для решения различных задач гидрологии и гидрогеологии. В ходе этих исследований специалистами соответствующих подразделений Института был накоплен опыт дешифрирования и интерпретации спутниковой информации, сформированы наборы дешифровочных признаков для идентификации природных, в первую очередь водных, объектов и выявления их динамики, а также определения степени антропогенной нагрузки на природную среду и оценки геоэкологического состояния изучаемых территорий. Так, Р.Г. Джамаловым и Ю.Л. Обьедковым была разработана методика гидрогеологического дешифрирования космоснимков, с помощью которой были установлены региональные закономерности подземного стока отдельных территорий, определено влияние тектонических и неотектонических структур на подземный сток в моря и крупные озера [см., например, 6]. Обьедковым были определены критерии поиска пресных подземных вод в аридных зонах [34]

¹ При составлении обзора исследований по спутниковой тематике, проводившихся в Институте в 1970–90-е гг., авторы использовали материалы статьи Ю.Л. Обьедкова [37]

и выявления термальных вод в сейсмоактивных районах [35], разработаны методические приёмы по составлению карт водообеспеченности и структуры землепользования в межгорных впадинах и речных долинах, а также карт геоэкологического районирования территорий в зависимости от степени антропогенного воздействия на среду и характера взаимодействия литологического состава пород с грунтовыми водами [36]. Новые подходы к моделированию процессов формирования стока горных рек с использованием спутниковых данных о динамике снежного покрова в их бассейнах разработаны Е.Л. Музылёвым. Им была разработана модель формирования стока горной реки с использованием данных о покрытости водосбора снегом [27]. Исследования устьевых областей рек и береговой зоны Каспийского моря в их динамике проводились Г.Ф. Красножоном и его группой [см., например, 10]. Исследования состояния прибрежных зон внутренних морей проводились группой исследователей с участием И.Е. Курбатовой [1, 2]. Исследования динамики природных экосистем дельт рек аридных районов под влиянием антропогенного изменения речного стока и их картографирование с использованием спутниковых данных проводились Н.М. Новиковой [33]. В.П. Салтанкиным были оценены возможности использования аэрокосмической информации для комплексного исследования водохранилищ (в 1974–76 гг. – нескольких среднеазиатских, а в последующие годы – в основном волжских, в т.ч. входящих в систему водоснабжения г. Москвы) [84, 87].

В конце 1978 г. в ИВП АН СССР была проведена Международная школа-семинар по использованию дистанционных методов в гидрологии, в работе которой участвовали специалисты СССР, Чехословакии, Польши, Болгарии, ГДР. В 1979 г. Институт водных проблем входил в число организаторов Международного семинара социалистических стран по дистанционному зондированию Земли из космоса «Исследование водных ресурсов и их загрязнения», проводившегося на Валдайской научной станции ГТИ.

По линии Совета «Интеркосмос» АН СССР специалисты Института участвовали в ряде международных экспериментов, проводившихся с целью исследования различных природных процессов при использовании аэрокосмической информации: «Тропик-1, -2, -3», «Гоби-Хангай-81», FIFE (Канзас, США), КурЭкс и других.

Результаты проводившихся специалистами Института экспериментальных и полевых исследований представлены в статьях и монографиях тех лет (см. библиографию в [37]).

Результаты современных исследований

Наличие описанной качественной спутниковой информации и накопленный специалистами Института в предшествующие годы опыт использования этой информации при решении гидрологических и геоэкологических задач позволили сформировать к концу 1990-х – началу 2000-х гг. два направления исследований, успешно развивающихся до настоящего времени: математическое моделирование гидрологических процессов и геоэкологический мониторинг состояния водных объектов и их водосборов.

Использование спутниковых данных при моделировании гидрологических процессов

Работы по моделированию гидрологических процессов с использованием спутниковых данных, проводившиеся в лаборатории гидрологического цикла ИВП РАН (рук. д.ф.-м.н. Л.С. Кучмент), включали разработку двух физико-математических моделей: формирования талого стока на речных водосборах и формирования водного и теплового режимов различных по размерам территорий.

Использование спутниковых данных при моделировании процессов формирования талого стока

В настоящем подразделе представлены результаты исследований, описанные в работах [24, 26, 44].

Использовавшаяся физико-математическая модель формирования снежного покрова и снеготаяния описывает динамику высоты снежного покрова и его плотности с учётом влияния растительности в течение периодов снегонакопления и снеготаяния [43]. Входными переменными модели являются данные стандартных срочных наблюдений на метеорологической сети и данные снегомерной съёмки, проводившейся на станциях, находящихся в исследуемых бассейнах рек Вятки и Дона. По этим данным производилась калибровка модели. Для построения полей непрерывных во времени оценок характеристик снежного покрова в модель, помимо наземных, вводились данные о покрытости территории снегом (ПТС) и температуре его поверхности, полученные по измерениям радиометра

MODIS (ИСЗ EO Terra) и оценки запасов воды в снеге (SWE, Snow Water Equivalent) с карт AEDySno, разработанных при использовании данных микроволнового радиометра AMSR-E (ИСЗ EO Aqua) [26]. В модели также использовалась информация с карт типов подстилающей поверхности, а также видов и густоты лесной растительности, построенных по данным радиометра AVHRR (ИСЗ NOAA). Рассчитанные по модели значения ПТС для нескольких метеостанций сравнивались с данными MODIS, а значения SWE – со значениями карт AEDySno. Показано [26], что результаты расчётов ПТС при малой залесенности водосбора практически совпадают со спутниковыми оценками, а при большой – могут существенно различаться. Поля рассчитанных по модели значений SWE отличаются от построенных по данным AMSR-E, причём несовпадения заметно проявляются в период снеготаяния. Скорее всего, это может происходить вследствие падения точности радиометрических измерений в данный период при зондировании толщи снега, напитанного водой [42].

Расчёты гидрографов талого стока исследуемых рек производились с помощью модели формирования стока [44]. Модель содержит описание процессов вертикального влагопереноса в промерзающей и оттаивающей почве и впитывания воды в мёрзлую почву, а также вертикального влагопереноса в незамёрзшей почве, испарения, задержания воды в бессточных микродепрессиях рельефа, поверхностного и подповерхностного склонового стекания воды и её движения по русловой сети. Для обоих водосборов получилось неплохое совпадение рассчитанного и фактического гидрографов. Более близкими к фактическим оказались гидрографы, рассчитанные по модели снежного покрова, чем вычисленные по данным, снятым с карт AEDySno.

Таким образом, использование значений SWE, определённых по данным AMSR-E, при моделировании стока может быть эффективно для интервалов времени, предшествующих началу снеготаяния. В то же время привлечение спутниковых оценок ПТС в периоды «пятнистого» залегания снега повышает точность оценки объёмов поступающей на водосбор воды, что позитивно сказывается на качестве прогнозов стока.

Использование спутниковых данных при моделировании формирования водного и теплового режимов обширных территорий

Разрабатываемая в ИВП РАН модель формирования водного и теплового режимов обширных территорий относится к семейству физико-математических моделей вертикального влаго- и теплообмена подстилающей поверхности (ПП) атмосферой (LS-модели, Land Surface Models, LSM). В первоначальной версии модели, разработанной в Институте и содержащей основные уравнения, описывавшие процессы влаго- и теплообмена [25], привлечение спутниковых данных не предполагалось, калибровка модели производилась по данным наблюдений на агрометеорологических станциях. Первой характеристикой, оценки которой, полученные по данным измерений со спутников, использовались в LSM, была температура подстилающей поверхности LST (Land Surface Temperature), и для её определения специалистами НИЦ «Планета» под руководством д.ф.-м.н. А.Б. Успенского был разработан специальный метод [94]. По мере запуска новых спутников и, соответственно, появления новой аппаратуры, расширялся спектр характеристик ПП и метеорологических характеристик, оценки которых могли быть построены по данным измерений этой аппаратурой с последующим использованием в модели. На сегодняшний день таких характеристик восемь: проективное покрытие растительностью B , листовой индекс LAI , нормализованный индекс вегетации $NDVI$, излучательная способность ПП E , количество осадков, LST трёх видов: температуры поверхности почвы T_{sg} и воздуха у поверхности растительного покрова T_a , принимаемая за температуру растительности, температура подстилающей поверхности T_s , $T_{s,eff}$ (эффективная) и T_{ls} . Оценки этих характеристик строятся по результатам тематической обработки данных измерений сканирующих радиометров AVHRR (ИСЗ NOAA), MODIS (ИСЗ EOS Terra и Aqua), SEVIRI (геостационарные ИСЗ Meteosat-9, -10) и МСУ-МР (ИСЗ Метеор-М № 2). Кроме того, по данным скаттерометра ASCAT (ИСЗ MetOp-A,-B) определяется влажность поверхности почвы.

Исследования проводились на примере находящейся в лесостепной зоне РФ части сельскохозяйственного Центрально-Чернозёмного региона (ЦЧР) площадью 227,3 тыс. км², включающей Курскую, Бел-

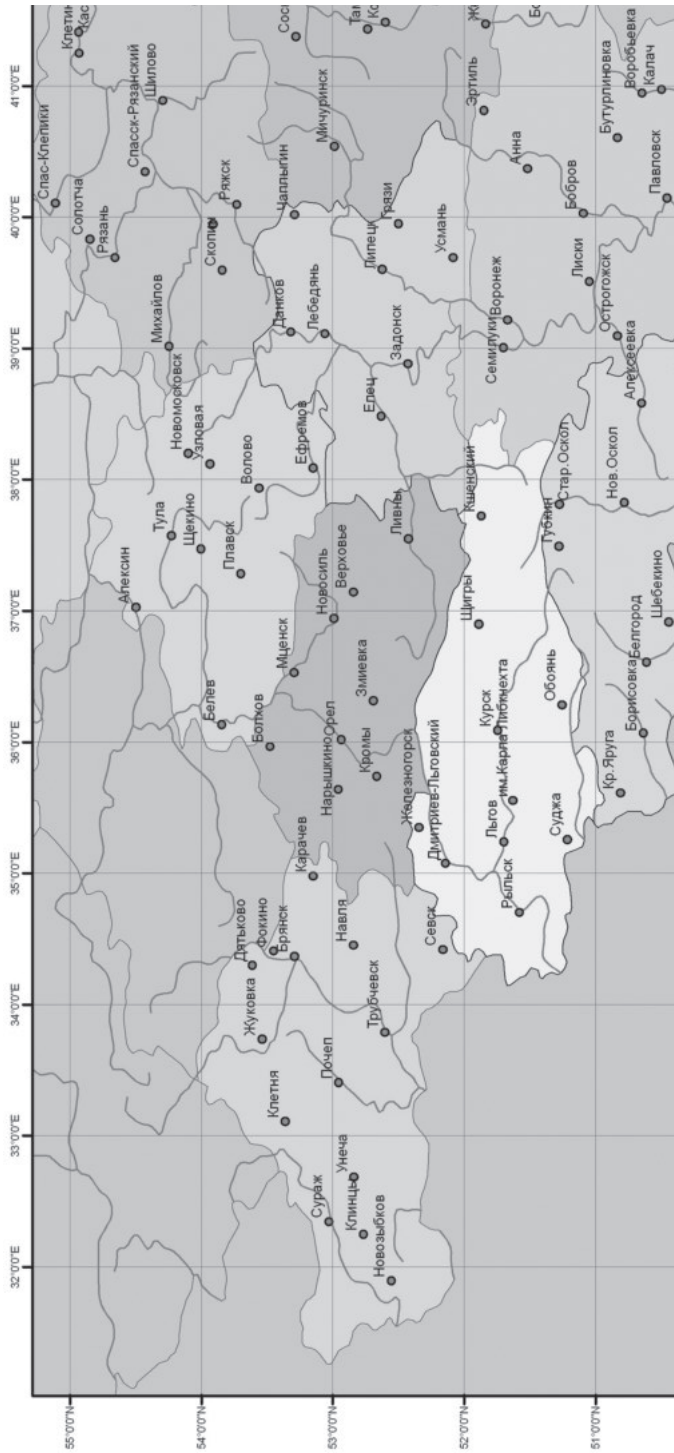


Рис. 1. Схема района исследований – участка территории Центрального района Европейской части РФ площадью 227,3 тыс. км²

городскую, Орловскую, Воронежскую, Липецкую, Тамбовскую и Брянскую области (рис. 1).

База наземных данных, использовавшихся при исследованиях, содержит результаты стандартных срочных трёхчасовых измерений метеорологических характеристик, а также ежедекадных измерений влажности и температуры почвы под различными культурами за сезон вегетации на 48 находящихся в регионе агрометеорологических станциях. Также на нескольких станциях производились измерения испарения с помощью испарителей. Расчёты характеристик водного и теплового режимов упомянутого участка территории ЦЧР с помощью адаптированной к спутниковым данным LSM производились для сезонов вегетации 2009–16 гг. Для сезонов 1997–2008 гг. аналогичные расчёты проводились для части водосбора р. Сейм (Курская область) площадью 7460 км².

Краткое описание LSM и методов оценки характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик по данным ИСЗ

Разработанная модель вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва-растительность-атмосфера» для вегетационного периода предназначена для расчёта влагозапасов W деятельного слоя почвы и его теплосодержания, испарения с голой почвы и транспирации влаги растительностью (суммарного испарения E_v), вертикальных потоков скрытого и явного тепла с ПП, воспроизведения распределений влажности и температуры почвы по глубине в их динамике, оценки температуры поверхностей почвы T_g и растительного покрова T_f , а также радиационной LST T_s . Процессы вертикального тепло- и влагопереноса описываются в модели системой уравнений в частных производных, записанных для 2-х слоёв: переменного по высоте слоя растительности и постоянного по глубине слоя почвы. Детальное описание модели и результаты её калибровки и верификации приведены во многих наших работах [см., например, 29].

Различия свойств ПП и метеоусловий учитываются в модели путём представления характеристик почв и растительности в качестве параметров, а метеорологических характеристик – в качестве входных переменных при определении значений большинства из этих величин по данным измерений на агрометеорологических

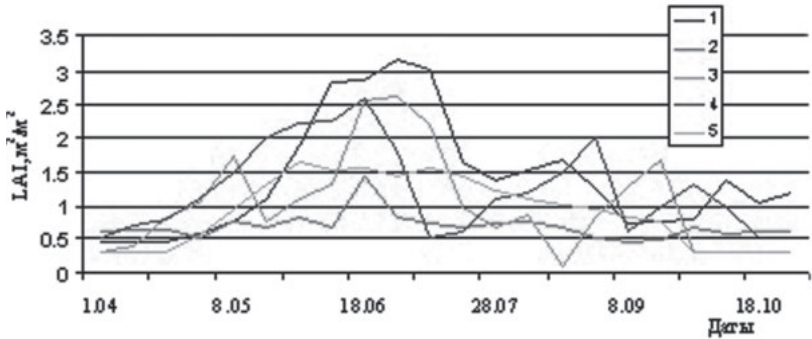


Рис. 2. Временные ходы LAI за период вегетации 2012 г. для агрометеорологической станции Белгород, построенные по данным AVHRR для зерновых (1) и трав (2), данным MODIS (3), наземным данным (4) и данным SEVIRI (5)

станциях и спутниковой информации. К числу последних относятся LAI , B , $NDVI$, E , 3 вида LST и осадки. Значения характеристик почв были получены при использовании базы данных HWSD (Harmonized World Soil Database). Адаптация модели к перечисленным спутниковым оценкам производилась путём перехода к вычислительной сетке размером 3Ч3 пиксела (элементарного разрешения) ИК каналов AVHRR (~7Ч5 км²), накладывавшейся на карту региона. Также в узлах сетки определялись значения параметров и входных переменных модели и производились вычисления влагозапасов почвы, суммарного испарения и

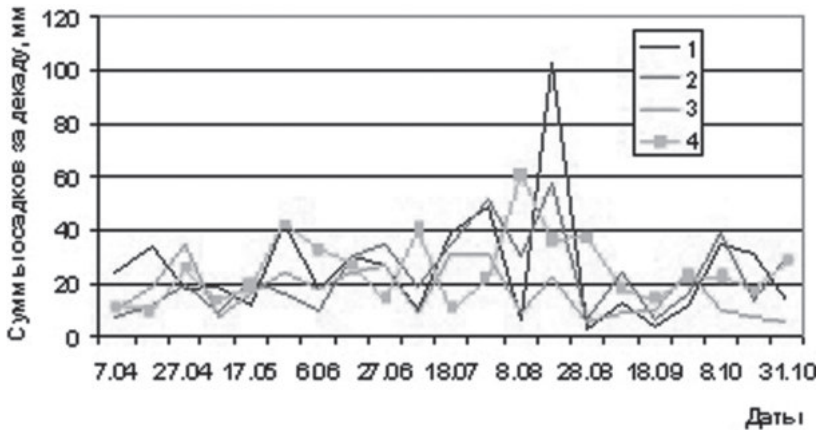


Рис. 3. Сумма осадков за декаду на агрометеорологической станции Дмитриев-Орловский для сезона вегетации 2016 г.: измеренные (1) и определённые по данным радиометров SEVIRI (2), MSU-MP (3) и AVHRR (4).

других характеристик водного и теплового режимов исследуемой территории, а также температур T_f , T_g и T_s .

Оценки названных характеристик по данным AVHRR/NOAA, MODIS/Terra и Aqua, SEVIRI/Meteosat-9, -10 и МСУ-МР/Метеор-М №2 были получены специалистами НПО «Планета» под руководством д.ф.-м.н. А. Б. Успенского с помощью разработанных ими технологий тематической обработки, описанных в работах [40, 3, 4]. Все технологии были адаптированы к территории ЦЧР. В указанных работах приведены оценки точности определения используемых характеристик ПП по сравнению с имеющимися данными наблюдений на наземной сети мониторинга. В качестве примеров на рис. 2 сравнивается временной ход LAI за сезон вегетации, построенный по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI и по наземным данным для нескольких агрометеорологических станций региона, а на рис. 3 приведён временной ход сумм осадков за декаду для сезона вегетации 2016 г., измеренных на агрометеорологической станции Дмитриев-Орловский и определённых по данным SEVIRI, AVHRR и МСУ-МР.

Использование спутниковых оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик при расчёте влагосодержания почвы и суммарного испарения

Основные результаты исследований, представленные ниже, подробно описаны в наших работах [28, 29, 30, 31, 45].

Спутниковые оценки характеристик растительности, LST и осадков использовались в LSM с учётом их распределений по площади исследуемой территории при реализации следующих процедур:

замены определённых по данным наземных наблюдений значений параметров модели LAI и B на их оценки по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI и МСУ-МР;

ввода в модель в качестве входных переменных значений $T_{s,eff}$, T_{ls} и T_w , определённых по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI и МСУ-МР, вместо их расчётных оценок по наземным данным;

ввода в модель также в качестве входных переменных величин осадков за сутки и по срокам, рассчитанных по данным AVHRR, SEVIRI и МСУ-МР, вместо результатов их измерений на агрометеорологических станциях региона;

учёта в модели пространственной неоднородности полей оценок LAI , B , $T_{s,eff}$, T_{ls} , T_w и осадков, построенных по спутниковым данным

AVHRR, MODIS, SEVIRI и МСУ-МР и оценок осадков, температуры и влажности воздуха, являющихся результатом интерполяции данных стандартных наземных наблюдений, путём создания алгоритмов и программ ввода в модель значений всех указанных величин в каждом узле её вычислительной сетки.

Все упомянутые процедуры замены данных наземных наблюдений на оценки по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI были успешно реализованы для сезонов вегетации 2009–16 гг., а на оценки по данным МСУ-МР – для сезонов вегетации 2015–16 гг. (после начала регулярно приёма данных с Метеора-М №2).

Возможность использования первой процедуры была подтверждена путём сравнения временных ходов за сезон вегетации: 1) величин LAI , определенных по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI, МСУ-МР и по наземным данным для нескольких агрометеорологических станций, и 2) фактических влагозапасов почвы W и суммарного испарения Ev и их значений, рассчитанных по модели при оценке LAI по данным названных сенсоров и наземных измерений. Работоспособность второй процедуры была проверена сопоставлением рассчитанных по модели значений LST T_s и поверхности растительного покрова T_f с их спутниковыми аналогами $T_{s,eff}$, T_{ls} и T_a и данными наземных наблюдений, а также сравнением временных ходов за сезон вегетации величин W и Ev , измеренных на агрометеорологических станциях и рассчитанных при использовании спутниковых оценок LST в качестве входных переменных. Первым действием при реализации процедуры ассимиляции в модели спутниковых оценок осадков является проверка точности этих оценок на каждом временном расчётном шаге, включающая сравнение площадных распределений полей осадков (их трехчасовых, суточных и месячных сумм), построенных по данным AVHRR, SEVIRI и МСУ-МР, а также путём интерполяции данных сетевых наземных наблюдений.

Расчёты характеристик водного и теплового режимов исследуемого региона при использовании спутниковых оценок осадков в качестве входной переменной модели были проведены для сезонов вегетации 2009–16 гг. На рис. 4 представлены результаты моделирования влагозапасов почвы W и суммарного испарения Ev за сезон вегетации 2016 г. для одной из агрометеорологических станций региона при использовании в расчётах величин осадков, определявших

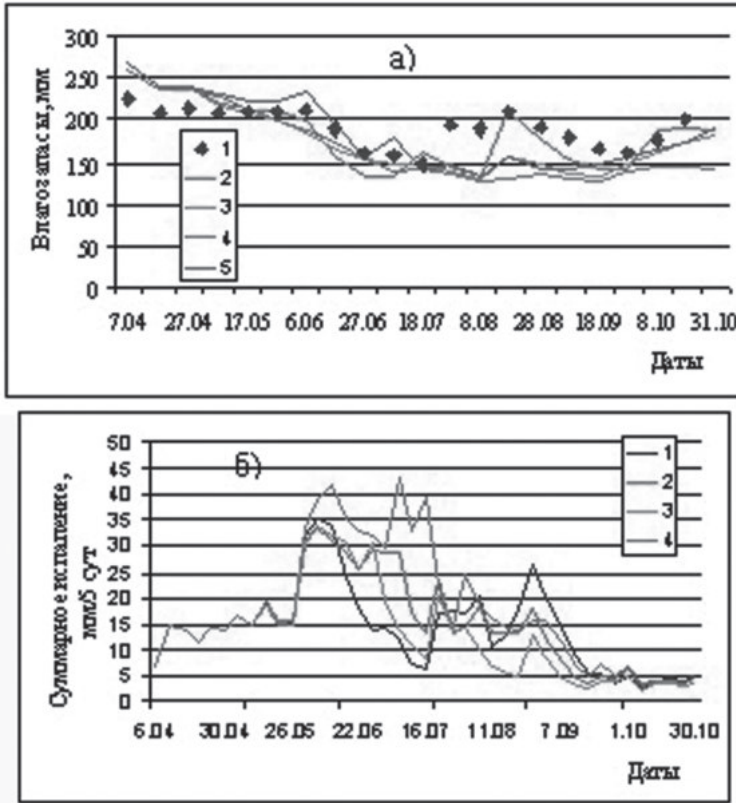


Рис. 4. Влаagoзапасы метрового слоя почвы W (а) и суммарное испарение E_v (б) на агрометеорологической станции Готня для сезона вегетации 2016 г. Слева: значения W измеренные (1) и рассчитанные по модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (2), SEVIRI (3), MСУ-MР (4) и AVHRR (5). Справа: значения E_v рассчитанные по модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (1), SEVIRI (2), MСУ-MР (3) и AVHRR (4)

ся по данным радиометров AVHRR, SEVIRI, MСУ-MР и по данным наземных наблюдений. Эти результаты показывают, что расхождения значений W и E_v находятся в допустимых пределах.

Для учёта пространственной неоднородности полей спутниковых оценок LST , LAI , B и осадков были разработаны алгоритмы ввода этих оценок в модель в узлах её вычислительной сетки. Для тех узлов, где в какие-либо сроки спутниковые оценки LST и осадков отсутствовали, значения температуры и влажности воздуха, а также интенсивности осадков рассчитывались с помощью процедуры

интерполяции IWDМ (Inverse weighted distance method) данных стандартных сетевых метеорологических наблюдений.

Конечным результатом моделирования являются оценки характеристик водного и теплового режимов исследуемой территории – влагозапасов почвы W , суммарного испарения E_v , инфильтрации воды в почву, потока влаги из её верхнего метрового слоя в нижележащие горизонты, потоков скрытого и явного тепла, а также радиационной LST T_s , температуры поверхности растительного покрова T_f и голой почвы T_g и распределений температуры и влажности почвы по глубине. Расчёты всех этих величин выполнены для территории части ЦЧР площадью 227 300 км² для сезонов вегетации 2009–16 гг. Достоверность полученных оценок W и E_v подтверждена результатами сравнения с данными измерений этих величин на агрометеорологических станциях, а также с их значениями, рассчитанными по модели при всех рассмотренных вариантах определения $LAI, B, T_{s,eff}, T_{isr}, T_a$ и осадков по информации AVHRR/NOAA, MODIS/EOSTerra и Aqua, SEVIRI/Meteosat-9, -10, МСУ-МР/Метеор-М №2. Погрешность оценки W для подавляющего числа сроков наблюдений рассматриваемых сезонов вегетации составляет 10–15% (см., например, рис. 4), что не превышает общепринятой величины ошибки определения значений W . Расхождения оценок E_v за пентаду при всех вариантах расчётов находятся в пределах нескольких мм (~20–25%), что также считается приемлемым результатом. Все рассчитанные с помощью LSM величины – W, E_v и другие характеристики водного и теплового режимов исследуемого региона – представлены в виде распределений по его площади. В качестве примера подобного распределения на рис. 5а-в изображены поля значений W , рассчитанных по модели при оценках суточных сумм осадков по данным наземных измерений, данным SEVIRI и МСУ-МР для исследуемой территории на одну из дат сезона вегетации 2015 г., а на рис. 5 г-е для того же дня показаны распределения разностей всех попарно взятых значений W . Как видно из последнего рисунка, погрешности представленных оценок W находятся в указанных выше пределах.

Таким образом, использование полученных по спутниковым данным оценок метеорологических характеристик и характеристик растительного покрова при моделировании процессов влаго- и теплообмена покрытых растительностью территорий с атмосферой

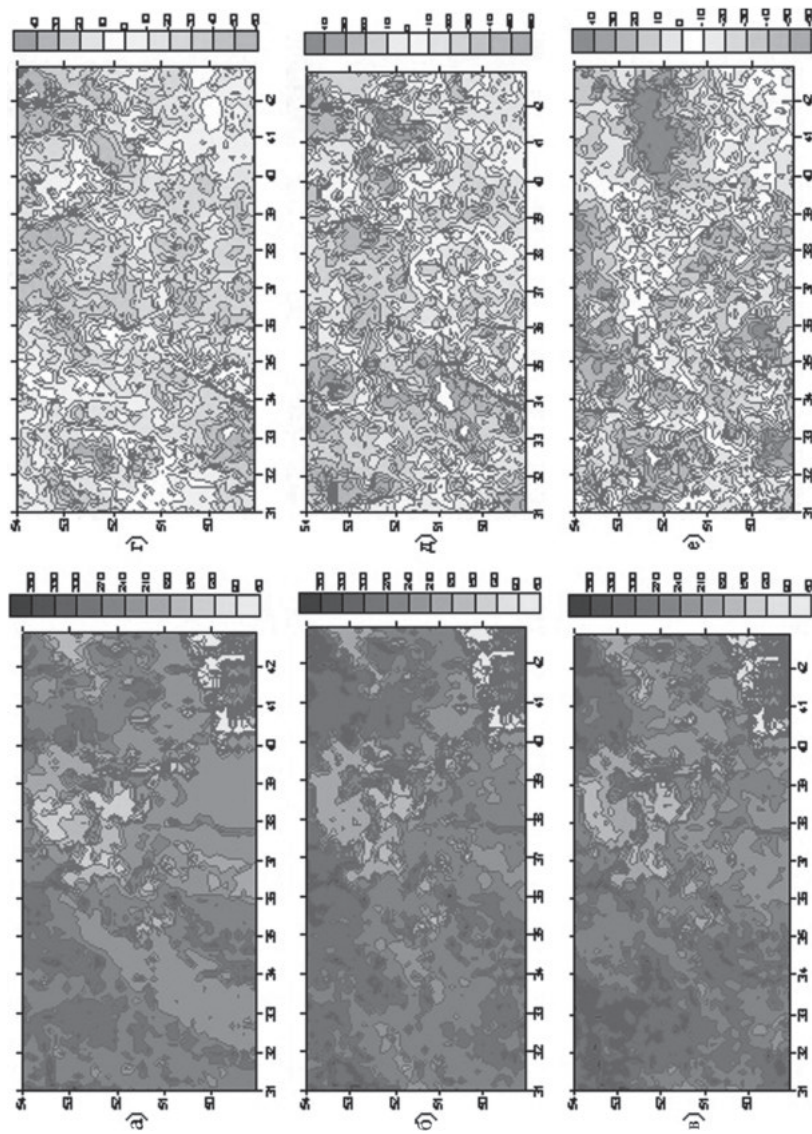


Рис. 5. Влагозапасы метрового слоя почвы W (мм) на 15.08.2015, рассчитанные по модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений, $W_{\text{наз}}$ (а), по данным SEVIRI, W_{SEVIRI} (б), по данным MSU-MR, W_{MSU} (в) и разности $(W_{\text{наз}} - W_{\text{SEVIRI}})$ (г), $(W_{\text{наз}} - W_{\text{MSU}})$ (д), $(W_{\text{SEVIRI}} - W_{\text{MSU}})$ (е) для территории Центрально-Чернозёмного района Европейской части РФ площадью 227,3 тыс. км²

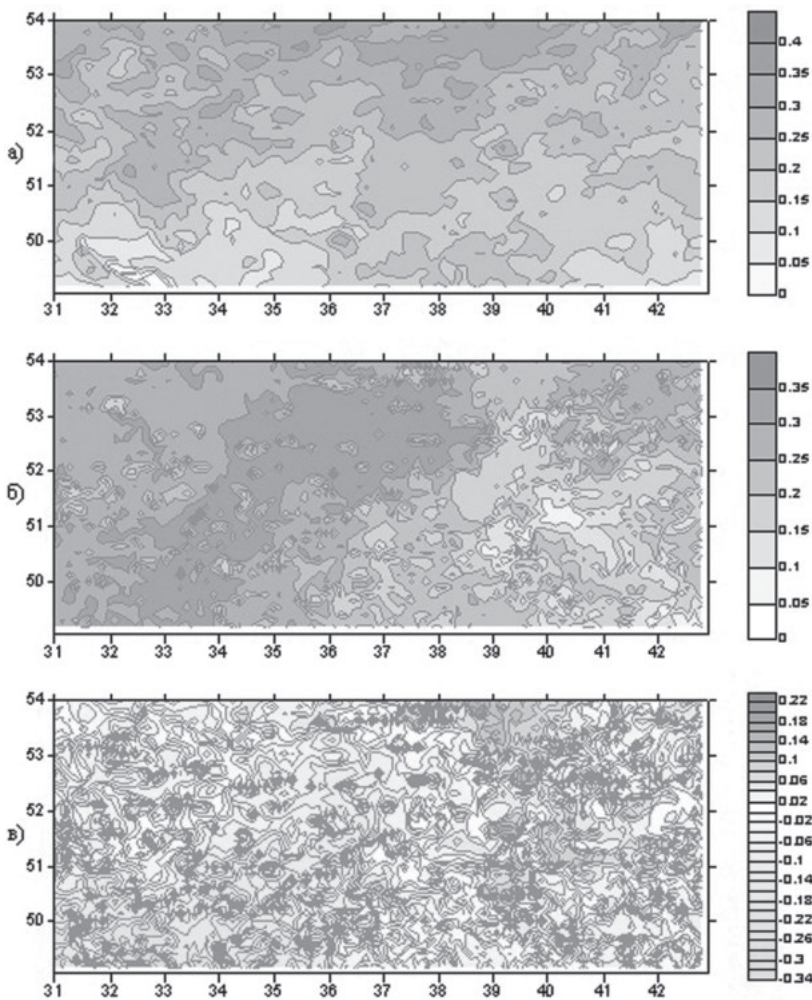


Рис. 6. Распределение по площади исследуемого региона значений влажности поверхности почвы, определённой по данным скаттерометра ASCAT/MetOp-B (а), рассчитанные по модели при использовании данных наземных наблюдений (б) и их разности (в) на 12.09.2016.

делает возможным построение и прослеживание динамики пространственных полей влагосодержания почвы, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов этих территорий, в том числе значительных по площади.

Использование данных скаттерометра ASCAT при моделировании влажности почвы

После запуска в 2013 г. спутника MetOp-B с установленным на борту скаттерометром ASCAT – аппаратурой активного зондирования подстилающей поверхности в СВЧ диапазоне – появилась возможность оценки влажности поверхности почвы в её динамике для обширной территории. Результаты измерений ASCAT выражаются в процентах от 100 до 0, соответственно, при полном насыщении почвы влагой или при её отсутствии. Полученные оценки преобразуются в объёмные влажности верхнего слоя почвы (0–3 см) при умножении на значения пористости. Проверка корректности данных оценок производилась при их сравнении с результатами расчётов влажности поверхности почвы с помощью LSM, выполненных при использовании данных наземных наблюдений (рис. 6).

Как видно из рисунка, для большей части территории расхождения спутниковых и модельных оценок поверхностной влажности находились в допустимых пределах ($\pm 0.05 \text{ см}^3/\text{см}^3$). Такая точность данных ASCAT позволяет использовать их в LSM при задании начальных условий для уравнения вертикального влагопереноса в почве. Так, замена начальных профилей влажности почвы при её полном насыщении на профили, определённые по значению влажности, полученному по данным ASCAT на время начала расчёта, приводит к повышению точности оценки с помощью LSM влажности поверхности почвы и её влагозапасов.

Полученные по данным ASCAT значения поверхностной влажности использовались также для расчёта с помощью LSM испарения с поверхности почвы и последующего формирования верхнего граничного условия для уравнения вертикального влагопереноса в почве (Как известно, интенсивность испарения с почвы зависит от влажности её поверхности). В стандартной процедуре расчёта профиля влажности почвы её значение на поверхности берётся с предыдущего шага по времени. В настоящем расчёте используются значения поверхностной влажности, определяемые по данным ASCAT. Временные ходы влажности поверхности почвы за сезон вегетации 2016 г., рассчитанной по модели с верхним граничным условием для уравнения влагопереноса, задаваемым по данным наземных изме-

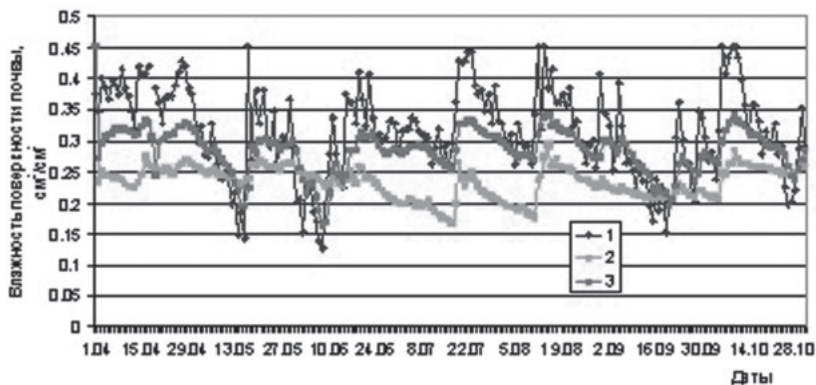


Рис. 7. Среднесуточные значения влажности поверхности почвы, определённые по данным скаттерометра ASCAT/MetOp-B (1) и рассчитанные по модели с верхним граничным условием, определяемым по данным наземных измерений (2) и формируемым по данным ASCAT (3). Агрометеорологическая станция Дмитриев-Орловский, сезон вегетации 2016 г.

рений и по данным ASCAT, на одной из агрометеорологических станций региона представлены на рис. 7.

Представленные позитивные результаты использования данных ASCAT при моделировании влажности почвы являются предварительными. Описанное направление исследований, в котором используются спутниковые данные, получаемые с помощью современной аппаратуры независимо от погодных условий, представляется перспективным и требующим дальнейшего развития.

Использование спутниковой информации в геоэкологических исследованиях водных объектов и их водосборов

Интенсивная антропогенная нагрузка на водные объекты, высокий уровень их загрязнения, недостаточно развитая сеть стационарных гидрологических и гидрохимических наблюдений привели к тому, что на сегодняшний день природоохранные организации испытывают постоянный дефицит достоверной информации о состоянии этих объектов. Информация, которая может быть необходима для принятия решений, направленных не только на повышение эффективности использования и охраны водных ресурсов, но и на минимизацию экологических рисков для окружающей природной среды и человека, может быть получена при проведении комплексного мониторинга водных объектов, с помощью которого

в единую базу данных аккумулируются как различные наземные наблюдения, так и данные дистанционного зондирования. Взаимосвязь различных направлений и методов мониторинга с ориентацией на потребности управления водохозяйственным комплексом и выделение наиболее перспективных технологий (в том числе ГИС-технологий), детально рассмотрена в монографии [32] под редакцией Г.М. Баренбойма и Е.В. Веницианова, большая часть авторов которой является сотрудниками ИВП РАН.

Важной производной космического мониторинга является геоинформационное картографирование, объединяющее компьютерные технологии, базы пространственно-временных картографических и спутниковых данных, преобразованных в соответствии с законами формирования образно-знаковой модели местности в итоговое картографическое произведение.

Результаты проводившихся в Институте последние два десятилетия исследований динамики и особенностей формирования прибрежных зон внутренних морей и крупных водохранилищ с использованием спутниковой информации позволили обосновать цели и задачи космического мониторинга различных водоёмов, сформулировать требования к данным дистанционного зондирования, необходимым для мониторинга, разработать его картографическое обеспечение и, как результат, составить карты, отражающих наиболее значимые проблемы конкретных водных объектов [15, 16, 22].

В основу приводившихся исследований положена концепция рассмотрения экологического состояния водоемов и их водосборов как единого геосистемного пространства [9]. При таком подходе за единицу исследования был принят частный речной водосбор, оценка вклада которого в изменение состояния водоёма определялась суммой характеристик, отражающих физико-географические, социальные и экономико-хозяйственные особенности его территории.

Изучение прибрежных зон внутренних морей с использованием данных ДЗЗ

К настоящему времени на большей части морских побережий складывается сложная экологическая обстановка, обусловленная взаимодействием негативных природных и антропогенных факторов. Морские водоёмы являются аккумуляторами всевозможных загрязняющих веществ (ЗВ), поступающих от рассредоточенных по

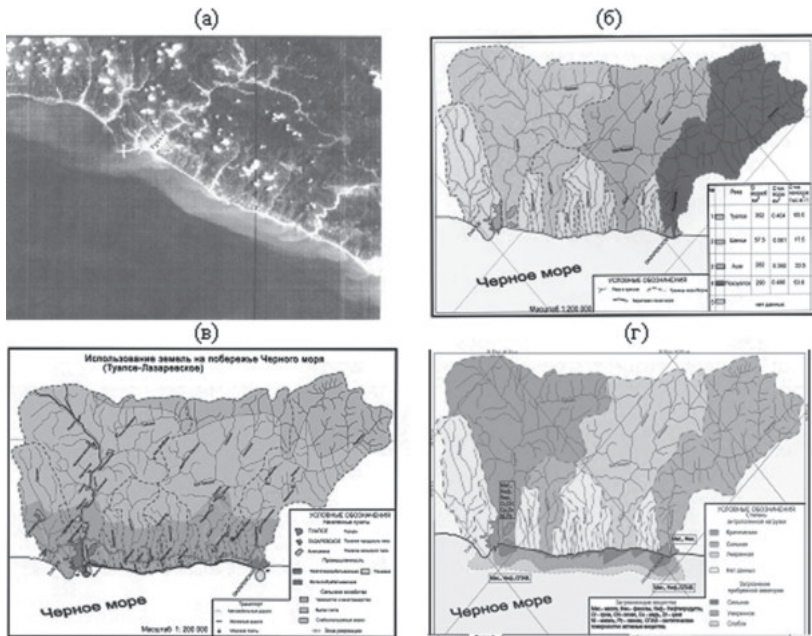


Рис. 8. Оценка антропогенного воздействия береговой зоны Чёрного моря в районе Туапсе-Лазаревская на прибрежные участки акватории: космическое изображение побережья и зоны мутьевого речного выноса (а), карта строения водосборов (б), карта хозяйственного использования земель с учётом высотной поясности (в), карта дифференциации водосборов по степеням антропогенной нагрузки с указанием загрязняющих веществ и выделением зон загрязнения акватории (г)

водосборной территории источников загрязнения [см., например, 14]. От величины, состава и качества речного стока в значительной мере зависит динамика береговой зоны моря, разрушение или наращивание берега, концентрация ЗВ в прибрежной зоне и др., поэтому при установлении причин экологических изменений, разработке прогноза состояния экосистем морских побережий и осуществлении природоохранных мероприятий необходимо учитывать ситуацию, складывающуюся на водосборных территориях. Сложность такого учёта определяется раздробленностью и несистематизированностью информации, которая зачастую рассредоточена по разным ведомствам и недоступна для пользователя. С помощью космического мониторинга можно решить большую часть задач, связанных с высокой динамичностью природных и антропогенно обусловленных процессов, присущих морским побережьям.

Исследования, проведённые для побережий южных морей РФ, позволили выявить наиболее эффективные для них направления использования спектрально-аналитической спутниковой информации [11].

Примеры практической оценки возможностей использования данных ДЗ были реализованы для участков Чёрного, Азовского и Каспийского морей (в пределах РФ) [11, 12, 13]. Ниже представлены результаты исследований для Чёрного моря.

Опыт совместного использования дистанционных, картографических и гидрологических данных был проведён для оценки антропогенного воздействия водосборов береговой зоны Чёрного моря в районе Туапсе-Лазаревская на прибрежные участки акватории (рис. 8) [11]. По космическим изображениям масштаба 1:300 000 с разрешающей способностью 30 м, полученным в 1987–95 гг. сканером МСУ-Э (ИСЗ «Ресурс-01») в спектральном диапазоне 0,5–0,6 мкм, были выделены области распространения речного стока. Известно, что динамика дальности выноса загрязнённого речного стока на взморье зависит от расходов воды, направления ветра, интенсивности морских течений. Космические изображения позволяют получить картину, результирующую взаимодействия всех трёх факторов.

Анализ результатов дешифрирования разновременных материалов КС и батиметрической карты прибрежной зоны показал, что, как правило, загрязнённые речные струи на этом участке акватории прослеживаются до изобат 25–50, реже 100 м, то есть на расстоянии от 5–6 до 10–12 км от берега (рис. 8а). Более детально интерпретация визуального дешифрирования речных струй рассмотрена в работе [12]. Загрязнение прибрежной части акватории оценивалось по степени загрязнения речного стока антропогенными источниками, находящимися на водосборах. Материковый сток на этом участке представлен девятнадцатью водосборами (рис. 8б), из которых гидрологические данные имелись только для четырёх. Для каждого водосбора по картографическим и научно-справочным источникам были установлены типы использования земель (селитебные, промышленные, сельскохозяйственные, рекреационные и т.д.) и определена их доля от общей площади водосбора (рис. 8в). На рис. 8г представлен упрощённый вариант карты «Антропогенное воздействие на побережье Чёрного моря», на которой речные водосборы побережья дифференцированы в соответствии с результатами комплексной оценки

по трём степеням антропогенной нагрузки (критической, сильной, умеренной), определены основные загрязняющие вещества, выносимые речным стоком, и выделены три степени загрязнения прибрежной акватории (сильное, умеренное, слабое). Основные ЗВ в неочищенных сточных водах представлены тяжёлыми металлами, фенолами, азотом, фосфором, БПК_{полн}, СПАВ, бактериальной загрязнённостью. Размер области мутьевого выноса из устья р. Туапсе составляет около 20 км² (примерно до изобаты 50 м). Этот участок с большой долей вероятности можно определить как наиболее загрязнённый на этом отрезке побережья. Подобный подход к изучению системы «водосбор–водоём» позволяет проводить предварительную оценку степени загрязнения водоёма, что особенно актуально для прибрежных морских зон.

Приоритетные направления геоэкологического мониторинга русловых водохранилищ, расположенных в различных климатических зонах

Русловые водохранилища – сложный, динамичный, многофункциональный природно-техногенный водный объект, нуждающийся в регулярном наблюдении и контроле с помощью государственного геоэкологического мониторинга.

В условиях значительного сокращения объёма экспедиционных работ и дефицита наземных данных в последние два десятилетия данные дистанционного зондирования позволяют в значительной мере осуществить наполнение информационной базы геоэкологического мониторинга современными качественными данными о гидрографических и морфометрических характеристиках берегов и притоков водохранилища, обновить топографические карты местности, выявить проблемные участки, построить цифровые модели рельефа прибрежных территорий, провести пространственно-временную экстраполяцию данных локальных наземных наблюдений. С помощью современной спектрально-спутниковой съёмки высокого разрешения можно осуществлять детальный мониторинг водной массы, её глубин, областей распространения взвесей, береговых деформаций, состояния прибрежной и водной растительности, оценки степени увлажнённости почв и растительности прибрежных зон, выявление локальных источников загрязнения.

Актуальной является задача оптимизации структуры мониторинга так, чтобы минимальным набором тематических блоков наиболее полно охватить самые значимые аспекты формирования водохранилища и трансформации окружающей среды в конкретной природной зоне. Основные задачи и уровни проведения мониторинга при наблюдении за негативными процессами в самом водоёме и на его водосборной территории, а также рекомендации по выбору оптимальных спектральных диапазонов космической съёмки в зависимости от ключевых факторов, влияющих на формирование водохранилищ, рассмотрены в [19].

С помощью единой методики нами были выполнены исследования различных водохранилищ, как давно существующих, так и только планируемых к созданию – Нижнебогучанского (мерзлотно-таежная зона), Рыбинского (европейская таежная зона умеренно континентального климата), Цимлянского (равнинная лесостепная зона засушливого климата), Краснодарского (степная предгорная зона), Веселовского (степная и полупустынная зоны засушливого климата) [23, 18, 20, 19, 17, соответственно].

Для всех перечисленных водохранилищ с помощью ГИС «Карта 2011» были составлены инвентаризационные и эколого-географические карты. В качестве исходного материала использовались космические снимки разных ИСЗ и топографические карты, масштаб которых определялся размерами объекта исследования или его отдельных участков.

Ниже, в качестве примера эффективности использования космических снимков для изучения водохранилищ, приведены полученные результаты для Нижнебогучанского и Цимлянского водохранилищ

Водохранилища мерзлотно-таежной зоны

Исследование проведено для территории будущего ложа Нижнебогучанского водохранилища на р. Ангаре, планируемого к заполнению в 2022 г. [23]. Место строительства расположено в зоне распространения многолетней мерзлоты островного типа, большую часть территории занимают южно-таёжные леса. Труднодоступность региона ограничивает проведение систематических гидрологических, геоморфологических и эколого-географических обследований.

Для оценки воздействия будущего водохранилища на преобразование территории и выявления специфики формирования самого водоёма были привлечены дополнительные источники информации, в первую очередь дистанционной и картографической. В качестве исходных материалов использовались цифровые топографические карты масштабов 1:1000 000, 1:20 000, 1:50 000, данные съёмки СИСЗ Landsat-7 и IKONOS за 2014 г. Привлечение ГИС «Карта 2011» позволило создать и произвести редактирование цифровых карт и обработку данных ДЗЗ, получить синтезированные изображения для обновления и детализации содержания топографических карт, нанести границы непосредственного и косвенного влияния водохранилища на природные и социальные объекты. На синтезированных изображениях выделены три зоны: водная поверхность р. Ангары до затопления, зона полного затопления берегов при заполнении водохранилища до отметки планируемого НПУ 140 м и зона подтопления – до горизонтали 160 м, которая условно может считаться границей влия-

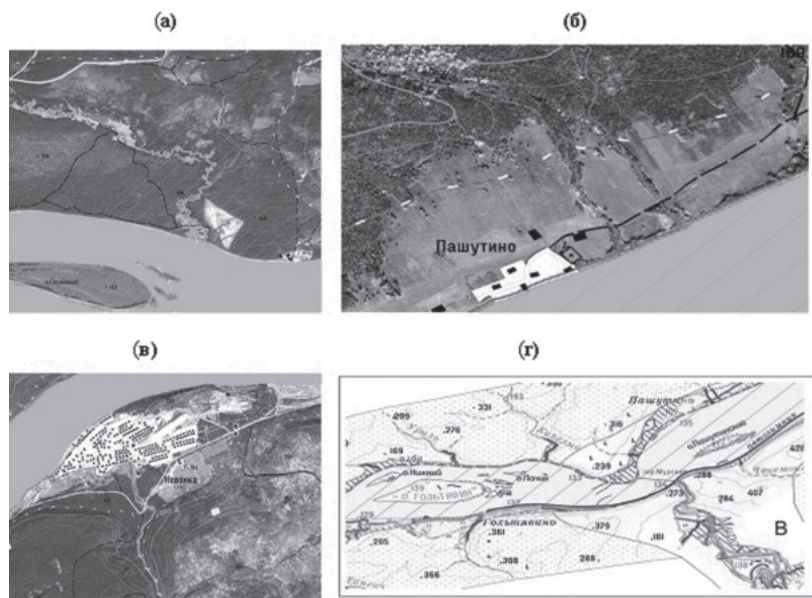


Рис. 9. Фрагменты синтезированного изображения КС и топографической карты масштаба 1:50 000. Затопляемая часть долины р. Сосновка (а), зоны затопления и подтопления в районе д. Пашутино (б), зоны затопления и влияния водохранилища в районе пос. Невонка и р. Невонка (в), фрагмент карты «Изменение природной среды зоны затопления Нижне-Богучанского водохранилища» масштаба 1:200 000 (г).

ния водохранилища на прилегающую территорию. На выбор этой отметки повлиял тот факт, что общей особенностью оползней в осадочных породах зоны многолетней мерзлоты является возможность их образования на склонах крутизной более 16° и высотой более 20 м [5]. Анализ синтезированных изображений «снимок-карта» показал, что в зону полного затопления попадут острова и все низменные и заболоченные участки прибрежных территорий, имеющие отметки высот менее 140 м, на которых в настоящее время находится значительная часть сельскохозяйственных угодий, населённые пункты, дороги и другие объекты инфраструктуры [23]. Например, у р. Сосновка, длина которой 29,0 км, протяжённость русла в зоне полного затопления составит 4,9 км, а в зоне влияния – 5,1 км (рис. 9а).

Поселок Невонка (1655 жителей), расположенный в устье р. Невонки, будет целиком находиться в зоне прямого и косвенного влияния (рис. 9б), а в деревне Пашутино ещё и почти все сельхозугодья попадают в зону возможного подтопления (рис. 9в). На протяжении всей длины будущего водохранилища (107 км) в Ангару с левого и правого берега впадает 57 притоков. Подпорные воды затопят устьевые участки рек и их долины, поднимутся вверх по течению, формируя заливы различной конфигурации и глубины вреза. Проведённый подсчёт длин всех притоков, расположенных в выделенных зонах, показал, что полностью будет затоплено 54 км нижних русловых участков и почти 160 км окажутся в зоне возможного влияния. С помощью ГИС «Карта 2011» была разработана базовая карта «Изменение природной среды в зоне затопления Нижнебогучанского водохранилища» масштаба 1:200 000, для создания которой была использована ландшафтная карта (рис. 9г). Совмещение тематических слоёв с топографическим содержанием и ландшафтным районированием позволило определить, какие типы ландшафтов (поймы крупных рек, поймы и низкие надпойменные террасы, плато увалисто-холмистые и грядовые, густо расчленённые), попадут в зону затопления и зону косвенного влияния будущего водохранилища. Использование спутниковых методов значительно увеличило объём и качество информации, необходимой для изучения труднодоступных территорий. Выделены и детализированы границы будущего водоёма, выполнено обновление содержания топографических карт, проведены расчёты площадей природных и антропогенных объек-

тов, затапливаемых полностью или попадающих в зону подтопления. Полученные результаты рассматриваются как начальный вклад в создаваемую базу данных мониторинга будущего водохранилища, содержащий информацию о современном состоянии природно-территориальных береговых комплексов р. Ангары в зонах планируемого затопления и предполагаемого влияния. Эти сведения могут использоваться для изучения трансформации водохранилища и береговой зоны на различных этапах его формирования в случае реализации проекта.

Водохранилища лесостепной равнинной зоны

Водохранилища юга РФ в гораздо большей степени, чем водохранилища других природных зон, чувствительны к изменениям климата и усилению антропогенной нагрузки. В последние годы практически на всех водоёмах региона из-за маловодья наблюдалось заметное падение уровня воды. Тяжёлая экологическая ситуация сложилась на Цимлянском водохранилище, созданном в 1952 г., крупнейшем искусственном водоёме на юге РФ. По данным Донского бассейнового водного управления (БВУ), уменьшение весеннего притока паводковых вод к Цимлянскому водохранилищу до 54% от нормы (в 2007 г.) и до 34% (в 2011) впервые за 27 лет привело к снижению его уровня больше чем на 4 м – с 36 м (отметки НПУ) до 31,75 м абс. В июне 2016 г. ситуация немного улучшилась – уровень воды был на отметке 33 м.

Инвентаризация состояния береговой зоны водохранилища в критической гидрологической ситуации проводилась по совместному анализу топокарт масштаба 1:100 000 (1978 г.), на которых, согласно требованиям их составления, положение береговой линии соответствует НПУ водохранилища (36,00 м абс) и космическим изображениям высокого разрешения, полученные с ИС3 WorldView-2 19 сентября 2011 г. [20, 21], когда уровень воды был близок к минимальному (32,15 м абс). По результатам сравнения снимков и топографических карт (рис. 10) выделены участки акватории и береговой зоны с наибольшими изменениями. Самым чувствительным к изменениям уровня является верхний бьеф водохранилища – Чирский плёс (рис. 10б, в). Обнажившиеся участки мелководного дна в виде островов, мелей, вдольбереговых отмелей отображаются различными оттенками

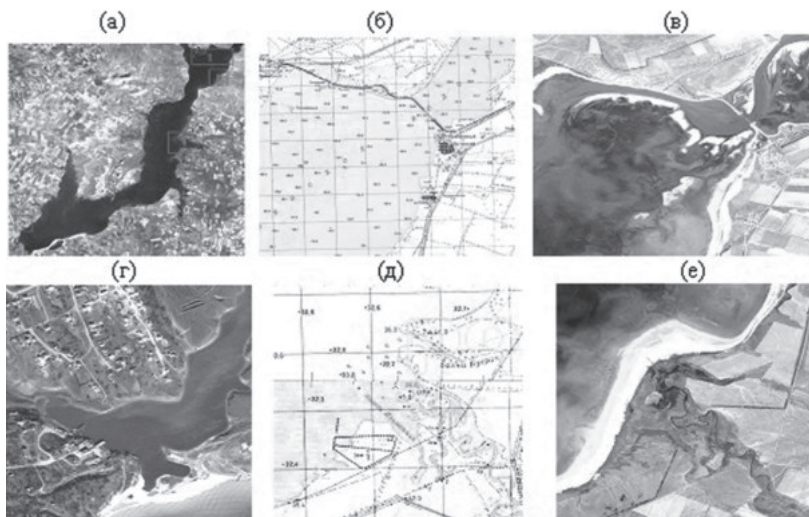


Рис. 10. Космический снимок Цимлянского водохранилища (а). Красными прямоугольниками отмечены наиболее чувствительные к обмелению участки; верхняя часть Чирского плёса на топографической карте 1978 г. при НПУ 36,0 м. (б) и на космическом снимке 2011 г. (в), балка Крутая полностью отделена от акватории, 2011 г. (г), устье Мышкова на топографической карте 1978 г. при НПУ 36,0 м. (д) и обмелевшее, заросшее в 2011 г. (е)

серого цвета. Водная поверхность полностью покрыта сине-зелёными водорослями. Полученная информация может быть использована как при обновлении батиметрической карты всего водохранилища с учётом заиления дна, так и при уточнении крупномасштабной лоции для обеспечения безопасности судового хода.

К участкам другого типа, также чувствительно реагирующим на колебания уровня и накопление наносов, относятся устья балок и рек бокового притока. Балка Крутая, расположенная в 4 км от г. Цимлянска, может служить характерным примером изменений в устьях подобных заливов. Сочетание понижения уровня и накопления наносов, поступающих с водосбора балки, привело к тому, что устье балки перекрыто широкой отмелью, вход в бухту полностью отрезан от водохранилища (рис. 10г). Примером трансформации устья малой реки может служить река Мышкова, длина которой 129 км и площадь водосбора 1393 км². На топокарте 1978 г. зафиксировано, что при впадении в водохранилище она образовывала залив длиной 5 и шириной 3 км, в центре которого был остров высотой около 10 м. По

берегам залива располагались рыбобпитомники, обвалованные двухметровыми дамбами (рис. 10д). На космическом изображении от 24 сентября 2011 г. IC3WorldView-2, (рис. 10е) отображено полное осушение залива, его зарастание кустарниковой и тростниковой растительностью, образование широкой отмели, перекрывающей бывший залив и узкую прорезь русла реки в ее илистых отложениях. Похожие ситуации прослеживаются и в устьях других рек, впадающих в водохранилище.

Карта динамики берегов Цимлянского водохранилища составлена с помощью геоинформационной системы Quantum GIS на которой показаны береговые линии, соответствующие уровням 36, 35, 34, 32 м абс., зоны последовательного осушения и типы берегов [20]. Опыт работы с материалами космической съемки высокого разрешения показал ее информационные возможности для изучения процессов переработки берегов, заиления мелководий, загрязнения и эвтрофирования водоема.

Выявленный характер изменений состояния Цимлянского водохранилища в период длительного маловодья может быть использован для решения инвентаризационных задач геоэкологического мониторинга береговой зоны водоема в последующие годы.

Заключение

Основным результатом проводившихся в ИВП РАН в последние годы исследований возможностей использования спутниковой информации при моделировании гидрологических процессов можно считать предложенный метод воспроизведения полей водного и теплового режимов покрытых растительностью территорий, в том числе характеризующихся недостатком наземных наблюдений. Основу метода представляет разработанная для территорий регионального масштаба физико-математическая модель влаго- и теплообмена участков суши с атмосферой, адаптированная к спутниковым данным о состоянии подстилающей поверхности и метеорологических условиях. При создании этого метода и его численной реализации:

разработаны новые или усовершенствованы существовавшие методы и технологии тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/Terra и Aqua, SEVIRI/Meteosat-9,-10, МСУ-МР/Метеор-М №2 и построения оценок характеристик растительно-

го покрова, температуры подстилающей поверхности и осадков. Все технологии адаптированы к территории части Центрально-Чернозёмного региона РФ площадью 227 300 км²;

разработаны процедуры использования в модели спутниковых оценок названных характеристик при учёте пространственной неоднородности их полей. Произведенные проверки функционирования модели подтвердили корректность применения данных процедур;

с помощью разработанной модели выполнены расчёты запасов почвенной влаги суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов территории исследуемого региона за сезоны вегетации 2009–16 гг. Значения всех рассчитанных величин представлены в виде распределений по площади данного региона, при этом погрешности их оценки находятся в допустимых пределах.

Результаты расчёта влагозапасов почвы как основной водноресурсной характеристики обширных сельскохозяйственных регионов могут использоваться для оценки влагообеспеченности этих регионов, в том числе в условиях антропогенных воздействий и изменений климата. Результаты оценки характеристик водного и теплового режимов территории могут применяться и для решения прикладных задач, например, для разработки норм полива сельскохозяйственных культур, произрастающих на засушливых землях. Успешность реализации разработанной модели напрямую определяется возможностью ассимиляции спутниковых данных разных спектральных диапазонов.

При изучении возможностей использования спутниковой информации в геоэкологических исследованиях водных объектов и их водосборов были получены следующие результаты:

в соответствии с бассейновой концепцией природопользования разработана структура комплексного мониторинга прибрежных зон морей и водохранилищ, а также его картографического блока, что позволило сформировать цельную картину изменений, происходящих в геосистеме приёмных водоёмов, и определить проблемные направления дальнейших исследований;

обоснован выбор типов космической информации, её пространственного охвата и масштаба в зависимости от зональных и ландшафтных условий расположения водохранилищ и их морфометри-

ческих характеристик, назначения и специфики хозяйственного использования, характера влияния боковых притоков разного ранга и их водосборов, природных особенностей и видов антропогенной нагрузки;

разработана методика получения на основе интерпретации дистанционных и картографических материалов количественных и качественных данных о пространственно-временных изменениях природно-территориальных комплексов в системе «водосбор–водоток–водоём», что обеспечило появление альтернативного источника информации при дефиците наземных наблюдений.

Целью дальнейших исследований по данному направлению является разработка методологии проведения геоэкологического мониторинга внутренних морей и крупных озёр и водохранилищ на основе совместного использования дистанционного и картографического методов исследований и ГИС-технологий в рамках создания единой технологической платформы комплексного мониторинга водохозяйственных систем.

В перспективе космический мониторинг водных объектов должен стать связующим элементом в системе комплексного управления речными бассейнами и прибрежными зонами приемных водоемов (озер, водохранилищ, морей), главная цель которого – сохранение водных ресурсов, внедрение рациональных природосберегающих технологий при хозяйственном освоении водосборов, не наносящем ущерба экосистемам и самому человеку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балашов В.М., Курбатова И.Е., Соколов Ю.С. Динамика границ Каспийского моря // В сб.: Прикаспийский регион. Проблемы социально-экономического развития. Т. 8. Аэрокосмические исследования. М.: Изд-во АН СССР, 1987. С. 229–239.

2. Верещака Т.В., Красножон Г.Ф., Курбатова И.Е. Особенности дешифрирования космических снимков морских побережий со спонно-нагонными явлениями // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. №4, 1986. С. 93–97.

3. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников. // Исследование Земли из космоса. №5, 2015. С. 30–43.

4. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и

эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13, №5, 2016. С. 291–303.

5. Гоголев Е.С. К вопросу изменения рельефа ложа и берегов северных водохранилищ // Проблемы инженерно-геологических изысканий в криолитозоне. Магадан: Колымское газетное издательство, 1989. С. 267–268.

6. Джамалов Р.Г., Обьедков Ю.Л. Применение дистанционной информации при прогнозной оценке подземного стока // Исследование Земли из космоса. №5, 1983. С. 60–66.

7. Калинин Г.П. От аэрокосмических снимков к расчётам и прогнозам стока. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 40 с.

8. Калинин Г.П., Курилова Ю.В., Колосов П.А. Космические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 184 с.

9. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании // Иркутск: Изд. Института географии СО РАН, 2001. 163 с.

10. Красножон Г.Ф. Географическая интерпретация материалов дистанционного зондирования устьевых областей рек и шельфовых зон морей // В кн.: Географическая интерпретация аэрокосмической информации. М.: Наука, 1988. С. 41–58.

11. Кукса В.И., Курбатова И.Е. О распространении загрязняющих веществ в прибрежных водах у Кавказского побережья Чёрного моря // Сб. статей «Водные проблемы на рубеже веков». М.: Наука, 1999. С. 208–216.

12. Кукса В.И., Курбатова И.Е. Изучение динамики вод и наносов в прибрежных зонах Чёрного и Азовского морей с использованием дистанционных методов // Сб. докладов V конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: ИВП РАН, 22–26 ноября 1999. С.188–191.

13. Курбатова И.Е. Выявление и картографирование зон затопления побережья Северного Каспия при стонно-нагонных колебаниях уровня моря по материалам космической съёмки // Водные ресурсы. Т. 20, №5, 1993. С.654–658.

14. Курбатова И.Е. Картографическое обеспечение экологического мониторинга морских побережий. // Экологические системы и приборы. №9, 2000. С. 2–6.

15. Курбатова И.Е. Космический мониторинг водных объектов – цели, задачи, возможности. // Сборник статей «Космический вызов XXI века». М.: Изд. Торус Пресс, Т. 1, 2005. С. 480–490.

16. Курбатова И.Е. Роль аэрокосмического мониторинга в информационном обеспечении комплексных экологических исследований системы «водосбор–водоём» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып. 2, Т. 2, 2005. С. 111–117.

17. Курбатова И.Е. Разработка структуры научно-справочного картографирования природной среды Кумо-Маньчской впадины для целей экологической экспертизы // Аридные экосистемы. Т. 16, №1 (41), 2010. С. 66–75.

18. Курбатова И.Е. Разработка картографического обеспечения экологических исследований Рыбинского водохранилища и его прибрежных территорий // Мологский край и Рыбинское водохранилище. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 145–150.

19. Курбатова И.Е. Космический мониторинг негативных ситуаций в прибрежных зонах крупных водоёмов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 9, №2, 2012. С. 52–59.

20. Курбатова И.Е. Использование космической информации для мониторинга природно-территориальных комплексов побережья Цимлянского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 10, №3, 2013. С. 217–227.

21. Курбатова И.Е. Использование ГИС-технологий для оценки влияния антропогенно нарушенных водосборов боковых притоков на Цимлянское водохранилище // Материалы III международной научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Майкоп: ИП Кучеренко В.О., 2015. С. 136–146.

22. Курбатова И.Е. Дистанционные технологии мониторинга водных объектов // Научные основы создания системы мониторинга качества природных поверхностных вод. Гл. 13. М.: Научный мир, 2016. С. 328–362.

23. Курбатова И.Е. Использование спутниковой информации для предварительной оценки изменения окружающей среды в зоне предполагаемого строительства Нижнебогучанского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14, №2, 2017. С. 195–205

24. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н., Романов П.Ю. Использование спутниковой информации о характеристиках снежного покрова в физико-математической модели формирования весеннего половодья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 7, №2, 2010. С. 167–173.

25. Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Старцева З.П. Моделирование влагопереноса в системе «почва–растительность–приземный слой атмосферы» для гидрологических задач // Водные ресурсы. №2, 1989. С. 32–39.

26. Кучмент Л.С., Романов П.Ю., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. Оценка характеристик снежного покрова путём совместного использования моделей и спутниковой информации // Исследование Земли из космоса. №4, 2009. С. 47–56.

27. Музылёв Е.Л. Моделирование стока горных рек и спутниковая информация. М.: Наука, 1987. 136 с.

28. Музылёв Е.Л., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Старцева З.П. Использование спутниковой информации при моделировании вертикального тепло- и влагопереноса для речных водосборов // Исследование Земли из космоса. №4, 2005. С. 35–44.

29. Музылёв Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В. Моделирование гидрологического цикла речных водосборов с использованием

ем синхронной спутниковой информации высокого разрешения // Метеорология и гидрология. №5, 2002. С. 68–82.

30. Музылёв Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В. Моделирование составляющих водного и теплового балансов для речного водосбора с использованием спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности // Метеорология и гидрология. №3, 2010. С. 118–133.

31. Музылёв Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В., Успенский С.А. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании компонент водного и теплового балансов территории Центрально-Черноземных областей России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 12, №6, 2015. С. 17–34.

32. Научные основы создания системы мониторинга качества природных поверхностных вод. М.: Научный мир, 2016. 462 с.

33. Новикова Н.М. Динамика растительности дельтовых равнин аридных районов вследствие антропогенного преобразования речного стока // В кн.: Биогеографические аспекты опустынивания. М.: Московский Филиал Географического Общества, 1985. С. 36–40.

34. Обьедков Ю.Л. Формирование естественных ресурсов подземных вод аридных районов. М.: Наука, 1986. 154 с.

35. Обьедков Ю.Л. Изучение термальных вод западного побережья Каспийского моря по материалам дистанционной информации // В сб.: Прикаспийский регион. Проблемы социально-экономического развития. Т. 8. Аэрокосмические исследования. М.: Изд-во АН СССР, 1987. С. 218–229.

36. Обьедков Ю.Л. Использование материалов космической съемки для составления средне- и мелкомасштабных гидрогеологических карт // В кн.: Получение и использование данных космической фотосъемки. М.: ЦНИИГАиК, 1992. С. 70–80.

37. Обьедков Ю.Л. Эволюция дистанционных методов исследования природных вод // В кн.: Воды суши. Проблемы и решения. М.: Ин-т водных проблем РАН, 1994. С. 528–541.

38. Салтанкин В.П. Перспективы применения дистанционных методов для изучения водохранилищ // Тр. координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 122. Л.: Изд-во Энергия, 1977. С. 129–135.

39. Салтанкин В.П., Соколов Ю.С. Использование дистанционной информации при обосновании водоохранных зон водохранилищ (на примере Ивановского водохранилища) // В кн.: Проблемы изучения и использования водных ресурсов. М.: ИВП АН СССР, 1979. С. 174–178.

40. Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А. Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. №3, 2010. С. 5–17.

41. Успенский А.Б., Щербина Г.И. Оценка температуры и излучательной способности поверхности суши по данным измерений уходящего

теплового излучения с ИСЗ NOAA // Исследование Земли из космоса. №5, 1996. С. 4–13.

42. Gelfan A., Muzylev E., Uspensky A., Startseva Z., Romanov P. Remote Sensing Based Modeling of Water and Heat Regimes in a Vast Agricultural Region // Remote Sensing – Applications. Ed. Boris Escalante-Ramirez. In-Tech – Open Access Publisher, Rijeka, Croatia, 2012. Chapter 6. P. 141–176.

43. Gelfan A.N., Pomeroy J.W., Kuchment L.S. Modelling forest cover influences on snow accumulation, sublimation and melt // Journal of Hydro-meteorology. V. 5, №5, 2004. P. 785–803.

44. Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation // Hydrology and Earth System Sciences. V. 14, 2010. P. 339–350.

45. Startseva Z., Muzylev E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S. Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data // International Journal of Remote Sensing. V. 35, №15, 2014. P. 5775–5799.

Изотопная гидрология: пути развития и решаемые проблемы

В.И. Ферронский

Введение

Идея вероятного существования в природе разных по массе атомов одного и того же элемента впервые была высказана английским геохимиком Ф. Содди в 1910 г. Он же предложил для таких атомов термин «изотопы». В 1913 г. Д. Томсон в Кавендишской лаборатории открыл первый стабильный изотоп с массой 22 у неона. В последующие несколько лет на сконструированном масс-спектрографе Ф. Астон открыл около 200 стабильных изотопов различных элементов, кроме водорода и кислорода. В 1929 г. У. Джиоки и Г. Джонстон открыли изотопы кислорода с массами 17 и 18, а в 1932 г. под руководством Г. Юри был зарегистрирован тяжёлый стабильный изотоп водорода дейтерий. К настоящему времени известно около 300 стабильных изотопов у элементов с атомным номером $Z \leq 83$. Начало открытию радиоактивных изотопов было положено французскими физиками А. Беккерелем (1896 г.), М. и П. Кюри (1898 г.). Теперь известно более 2000 радиоактивных изотопов, из которых около 300 – природные, а остальные получены искусственно на основе ядерных реакций.

Вскоре после открытия стабильных изотопов водорода и кислорода начались исследования по изучению их распространённости в природных речных, озёрных, морских, дождевых и подземных водах. Первые такие работы были выполнены в период 1932–41 гг. С появлением более совершенных масс-спектрометрических приборов А. Демпстера и А. Нира, и особенно после их усовершенствования К. МакКинни в 1950 г., исследования изотопного состава природных вод приобрели широкий размах. В организации и проведении исследований по гидрохимии водорода и кислорода в разных странах немалая заслуга принадлежит таким исследователям старшего поколения, как Юри, К. Ранкама, А.П. Виноградов, которые сыграли важную роль в развитии геохимии изотопов в целом.

Среди общих природных закономерностей было установлено, что вода основного резервуара гидросферы – Мирового океана обладает весьма однородным изотопным составом водорода и кислорода. Этот факт дал основание Г. Крейгу [Craig, 1961]

предложить её в качестве стандарта, относительно которого стали выражать измерения содержания дейтерия и кислорода-18 во всех других объектах.

Положительную роль в развитии основ изотопной гидрологии сыграла инициатива ЮНЕСКО по проведению Международного гидрологического десятилетия (МГД) 1965–74 гг. В программе этого проекта были предусмотрены гидрологические исследования с помощью изотопных и ядерных методов. Для организации и руководства этими работами была создана рабочая группа из специалистов ведущих стран мира, работавшая под эгидой МАГАТЭ. Основным достижением рабочей группы явилась организация мониторинга изотопного состава атмосферных осадков на глобальной сети гидрометеостанций МАГАТЭ/ВМО. Отбор и анализ среднемесячных проб атмосферных осадков стали основой для развития глобальной гидрологии. Автору довелось быть членом рабочей группе, а позднее сотрудником МАГАТЭ, участвовать в разработке и исполнении программы изотопных исследований. К настоящему времени накоплен большой фактический материал по изотопному составу атмосферных осадков земного шара. Данные о концентрациях дейтерия и кислорода-18 в осадках систематизируются и публикуются МАГАТЭ. Банк этих данных доступен для использования.

Наиболее важный вывод, который следует из рассмотрения изотопного состава подземных вод, состоит в том, что их формирование в артезианских бассейнах протекало в результате смешения в разных пропорциях вод морского генезиса с метеорными водами более поздних эпох. Какие-либо факты присутствия в их составе воды ювенильного происхождения не найдены. Более того, на примере использования данных об изотопном составе гидротерм в областях современного вулканизма во всех районах мира было установлено, что вода горячих источников представляет атмосферные осадки местного происхождения. Не менее убедительно было показано, что в большинстве исследованных рудных месторождений гидротермального происхождения основная роль в исходных рудоносных гидротермальных растворах принадлежит метеогенным водам.

Большую роль в унификации способов выражения изотопного состава водорода и кислорода и некоторых других элементов при-

родных объектов играет работа, которую периодически проводит Секция изотопной гидрологии МАГАТЭ по взаимному сравнению основных изотопных стандартов. В этой работе принимают участие ведущие масс-спектрометрические лаборатории многих стран. Наиболее популярным стандартом для выражения изотопного состава водорода и кислорода является Венский стандарт средне-океанической воды (SMOW).

История исследования космогенных изотопов берёт начало с 1912 г., когда австрийский физик В. Гесс по эффекту ионизации молекул воздуха, возрастающему с высотой, открыл космические лучи. Было установлено, что первичное космическое излучение солнечного, галактического и метagalacticкого происхождения, обладающее высокой энергией частиц (в основном протонов), в результате взаимодействия с ядрами атомов воздуха образует вторичное, с меньшей энергией излучение. Вторичное излучение при ядерных реакциях с ядрами атомов воздуха образует множество космогенных радиоактивных изотопов. Наиболее широкое распространение в гидрологической практике изучения природных вод нашли космогенные изотопы – тритий и радиоуглерод.

В 1934 г. М. Олифант, П. Гартек и Э. Розерфорд при бомбардировке дейтонами соединений, содержащих дейтерий, обнаружили треки частиц с массами 3, которые были отнесены к тритию и гелию. Предположение о радиоактивном превращении трития в гелий подтвердили Д. Альварец и Р. Корног в 1939 г.

В 1934 г. Л. Кури, а затем в 1936 г. Т. Боннер и М. Брубакер, К. Бурхем и М. Гольдхабер, облучая в камере нейтронами воздух, обнаружили, что на атомах азота по реакции $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ образуется радиоуглерод. В 1941 г. Р. Корног и У. Либби показали, что при реакциях (n, p) на азоте быстрые нейтроны образуют тритий, а медленные – ^{14}C . В 1946 г. Либби зарегистрировал радиоуглерод в атмосфере и пришёл к выводу о том, что ^{14}C должен содержаться в биосфере. Так было положено начало радиоуглеродному датированию. Период полураспада ^{14}C был определён не сразу. Вначале по аналогии с ^{35}S предполагалось, что он равен 4 месяцам. Затем называлась цифра 25 000 лет, и лишь позднее было найдено его реальное значение, равное 5730 годам.

В доядерную эпоху удалось выполнить лишь единичные измерения природных концентраций трития в воде. В период с 1952 по 1963 г. при испытаниях термоядерного оружия в атмосферу было выброшено такое количество трития, которое на два порядка превышало его естественное содержание. Что касается радиоуглерода, то его содержание также было пополнено ^{14}C бомбового происхождения, однако в значительно меньших пропорциях. Радиоактивность космогенных изотопов определяется радиометрическими методами с помощью низкофонных бета-спектрометров со сцинтилляционными детекторами или с использованием пропорциональных счётчиков внутреннего наполнения.

Концентрацию трития в природных объектах принято выражать в тритиевых единицах (ТЕ). Одна ТЕ соответствует содержанию одного атома трития на 10^{18} атомов протия. До недавнего времени считалось, что период полураспада трития составляет 12,26 лет. В сентябре 1979 г. группа экспертов, собравшаяся в Вене в МАГАТЭ, рассмотрела новые экспериментальные данные Национального бюро стандартов США и приняла новое значение периода полураспада трития, равное 12,430 лет. Этому новому значению периода полураспада (стандарт NBS SRM-4526C) соответствует постоянная распада $\lambda=0,55764 \text{ год}^{-1}$. При этом 1 ТЕ=7,088 расп. мин. в 1 кг^{-1} воды или 1 ТЕ=3,193 пКи кг^{-1} воды. В 2000 г. при работе по программе МАГАТЭ TRIC-2000 период полураспада трития был уточнён и принят равным 12,32 года при постоянной распада $\lambda=0,05625 \text{ год}^{-1}$ (1 ТЕ=0,119 Бк на 1 кг воды).

Радиоактивность других космогенных радионуклидов измеряют в единицах распада в минуту на 1 кг или 1 т воды. Суммарная активность радионуклидов измеряется в Кюри (Ки) или Беккерелях (Бк). 1 Ки эквивалентен $3,7 \cdot 10^{10}$ распад/с или $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Для унификации радиоуглеродных измерений предложено выражать содержание радиоуглерода в процентах (или промилле) от стандарта современного углерода. В качестве международного стандарта используют эталон Национального бюро стандартов США (NBS), которым является щавелевая кислота с радиоактивностью 14,3 распад/мин на 1 г углерода ($1,176 \cdot 10^{-10}\%$ ^{14}C). Стандарт современного углерода определён как удельная активность ^{14}C в древесине, произрастающей в 1950 г., после введения поправки на изотоп-

ное фракционирование и присутствие в атмосфере «индустриального» углекислого газа [Stuiver, Suess, 1966].

Другими космогенными изотопами для исследования воды гидросферы являются ^7Be , ^{10}Be , ^{22}Na , ^{26}Al , ^{32}Si , ^{32}P , ^{33}P , ^{36}Cl , ^{37}Ar , ^{39}Ar . Исследование закономерностей распределения этих изотопов в природных водах сдерживается главным образом техническими трудностями отбора, концентрирования и техники измерений соответствующих проб.

Радиогенные изотопы уран-ториевых рядов, период жизни которых сопоставим со временем существования гидросферы и Земли в целом, до последнего времени использовались, как правило, для геохронологии. Однако исследования по изучению их распределения в природных водах показали, что они являются весьма ценным индикатором процессов движения и возраста природных вод и донных осадков как в региональном, так и глобальном масштабе за длительное геологическое время. Здесь, как и в случае космогенных изотопов, есть технические трудности с измерением низких уровней природной радиоактивности.

Стабильные изотопы гидросферы

В природной воде на Земле на 10^6 молекул H_2^{16}O в среднем приходится 320 молекул HDO , 380 молекул H_2^{17}O и около 2000 молекул H_2^{18}O . Отношение содержания дейтерия к противу $\text{D/H} = 0,000155$ (0,0150 at.%), а отношение содержания кислорода $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 0,002$ (0,2 at.%).

Пределы колебания концентраций дейтерия на порядок и более превосходят пределы колебания в содержании тяжёлого кислорода. Объясняется это тем, что дейтерий и протий разделяются в природных процессах более эффективно, чем любая другая пара стабильных изотопов в силу большей разницы в атомных весах или силе тяжести (табл. 1).

Вариации относительного содержания дейтерия в глубоких слоях океанов составляют около 4‰, а кислорода-18 – 0,3‰. В поверхностном слое океана наблюдаются некоторые региональные изменения. Величина их зависит от температуры воды и составляет для дейтерия около 35‰ и для кислорода-18 около 3‰. Пониженное содержание дейтерия в поверхностном слое океанов отмечается в

Таблица 1

Концентрации стабильных изотопов некоторых элементов в природных объектах

Элементы	Отношение изотопов	Пределы изменения абсолютной величины	Относительное изменение предельной величины
H	D/H	0,000079–0,000195	147
Li	⁸ Li/ ⁷ Li	0,079–0,084	6
B	¹¹ B/ ¹⁰ B	0,226–0,234	3,5
C	¹³ C/ ¹² C	0,01079–0,010225	13
O	¹⁸ O/ ¹⁶ O	0,001893–0,002083	10
Si	³⁰ Si/ ²⁸ Si	0,0332–0,0342	0,5
S	³⁴ S/ ³² S	0,0427–0,0491	13

тех районах, где на изотопный состав оказывает влияние вода, поступающая от таяния льда. В высоких широтах, где поверхностный слой замерзает, может происходить фракционирование изотопов водорода и кислорода в системе лёд–жидкость. Коэффициент разделения в этом случае составляет около 1,0180 для дейтерия и примерно 1,0030 для кислорода-18. В экваториальной части океана, где

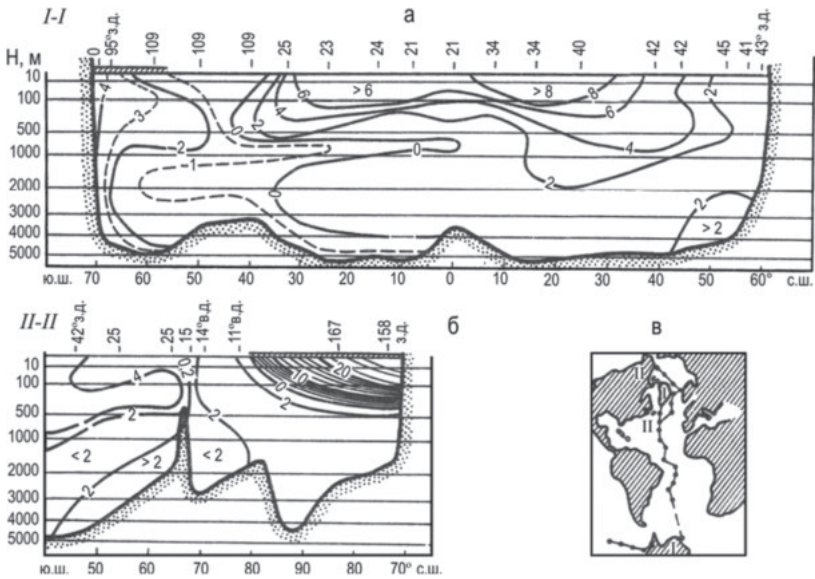


Рис. 1. Распределение концентраций дейтерия, ‰, по разрезу в водах Атлантического и Северного Ледовитого океанов

интенсивно испаряется вода, происходит некоторое обогащение поверхностного слоя тяжёлыми изотопами.

Пределы изменения концентраций D и ^{18}O по широте и глубине для глубоких океанических вод более чем на порядок превышают абсолютную погрешность, с которой современная методика и техника масс-спектрометрических измерений позволяет производить массовые определения содержания дейтерия ($\pm 2\%$) и кислорода-18 ($\pm 0,02\%$). На основе выполненных исследований можно составить общую картину распределения D и ^{18}O в водах океана.

На рис. 1 в изолиниях показана картина распределения дейтерия по разрезу и в поверхностном слое воды Атлантического океана и бассейна Арктики [Redfield, Friedman, 1964].

Из анализа приведенных данных вытекают следующие общие закономерности в распределении D и ^{18}O в глубинных водах океанов [Craig, Gordon, 1965]:

1. Содержание дейтерия и кислорода-18 в океанических водах Северного полушария выше, чем в водах Южного полушария.

2. Воды Арктического бассейна весьма однородны по изотопному составу и практически не отличаются от вод Норвежского моря, но отличаются от глубоких вод Северной Атлантики.

3. Воды Атлантического океана перемешиваются в северном направлении и имеют значительные вариации изотопного состава даже в субтропических широтах северного полушария.

4. Глубинные воды Индийского и Тихого океанов весьма однородны по изотопному составу. Отмечены лишь некоторые вариации в высоких южных широтах. При этом содержание тяжёлых изотопов повышается к низким широтам.

5. Воды Тихого и Атлантического океанов и приполярные воды Антарктики весьма близки по изотопному составу.

6. В водах глубоких тихоокеанских впадин относительное содержание ^{18}O примерно на $0,2\%$ выше, чем в глубоких водах этого океана в целом.

Изотопные соотношения для поверхностных океанических вод значительно изменяются в широтном плане. Однако и в этом случае для экваториальных и умеренных широт между D и ^{18}O сохраняется линейная зависимость вида $\delta D = n \delta^{18}\text{O}$. Значение n изменяется в зависимости от соотношения объёмов испарения и осадков для

данного региона и равно: для северной части Тихого океана – 7,5, для Северной Атлантики – 6,5, для Красного моря – 6.

Палеотемпературные исследования древних океанических осадков и ледников по изотопным отношениям $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ показали, что пределы колебания температуры поверхностных вод океанов в экваториальной зоне за последние 730 000 лет не превышали 5–6°C [Emiliani, 1978]. При этом отклонения изотопных отношений $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ воды не превышали 0,5‰ от современного уровня. Аналогичные результаты были получены на основе анализа дейтерия в глинистых минералах и кремнистых сланцах морского генезиса различного возраста. По данным Д. Имбри [Imbrie, 1985] температура поверхностного слоя океана в ледниковые эпохи снижалась только на 2°C.

Аргументы, свидетельствующие о стабильности изотопного и химического состава океанов, рассмотрены Х. Лоуэнштамом [Боуэн, 1969]. Р. Боуэн считает, что поскольку изотопный состав кислорода, концентрации SrCO_3 и Mg CO_3 и отношения Sr/Ca и Mg/Ca у изученных Х. Лоуэнштамом раковин ископаемых моллюсков всегда лежат в пределах величин, характерных для современных образцов, очень вероятно, что концентрация ^{18}O в океанических водах оставалась постоянной по крайней мере в течение последних 250 млн лет.

Существенную роль в изменении изотопного состава вод океана могли играть эпохи оледенения. По данным, приведённым в работе [Fairbridge, 1964], общее количество воды в океане в неледниковые эпохи, например в мезозое, было на 5% больше, чем в эпохи оледенения. Если учесть, что весь избыток воды поступал за счёт таяния льдов, то можно рассчитать количество дейтерия в океане в неледниковые эпохи – оно примерно на 10‰ меньше, чем в период оледенения. По данным Р. Боуэна [1969], избыток льда в плейстоцене оценен в $40,2 \cdot 10^6 \text{ км}^3$, что соответствует увеличению объёма океана в неледниковые эпохи на 4%. По расчётам Эмилиани [Emiliani, 1970], повышенное содержание кислорода-18 в океане в ледниковые эпохи равнялось 0,5‰. При этом он исходил из предположения, что увеличение объёма льда в плейстоцене составляло $40 \cdot 10^6 \text{ км}^3$, а средний изотопный состав кислорода льда $\delta^{18}\text{O} = -15\text{‰}$. Изменение концентраций дейтерия и кислорода-18 в океанских водах в процессе

смены ледниковых и неледниковых эпох составляло не более $\pm 10\%$ по дейтерию и $\pm 1\%$ по кислороду-18.

Основным фактором фракционирования изотопных разновидностей воды в поверхностном гидрологическом цикле является различие в давлении насыщенного пара отдельных изотопных разновидностей воды: $p_{\text{H}_2^{16}\text{O}} > p_{\text{H}_2^{18}\text{O}} > p_{\text{HDO}}$. В равновесных условиях коэффициент разделения изотопных разновидностей молекул воды определяется отношением давления насыщенного пара лёгкого p и тяжёлого p' компонентов: $\alpha = p/p'$. При температуре 20°C коэффициент для HDO и H_2^{18}O равен соответственно 1,08 и 1,009. В этом случае пар в равновесии с водой будет беднее на 80% дейтерием и на 9% кислородом-18. Изотопный состав пара $R_n = R_B/\alpha$. Если в качестве стандарта принята вода, то

$$\delta_n = (R_n - R_B)/R_n = 1/\alpha - 1, \quad (1)$$

а изотопный состав воды по отношению к равновесному пару (за стандарт принят пар) по аналогии будет равен

$$\delta_b = \alpha - 1. \quad (2)$$

Коэффициенты фракционирования дейтерия и кислорода-18 возрастают с понижением температуры. Зависимость коэффициента α от температуры в общем виде выражается уравнением:

$$\alpha = a \exp(b/RT). \quad (3)$$

Для кислорода эта зависимость в интервале температур от -20 до $+100^\circ\text{C}$ описывается уравнением Жаворонкова $\alpha_{18\text{O}} = 0,982 \exp(15,788/RT)$.

Наиболее важным процессом при формировании изотопного состава атмосферных осадков является конденсация водяного пара. В замкнутой системе первое небольшое количество конденсата, очевидно, имеет изотопный состав, аналогичный изотопному составу жидкости, находящейся в равновесном состоянии с паром. При дальнейшей конденсации влаги изотопный состав конденсата δ_k изменяется по уравнению [Dansgaard, 1964]:

$$\delta_k = (1/\alpha_0)(1/\epsilon F_n + 1) - 1 \quad (4)$$

где $\epsilon = (1/\alpha) - 1$; α_0 – значение коэффициента разделения в начале процесса; F_n – оставшаяся часть пара.

При изотермическом процессе $\alpha_0 = \alpha$. Если конденсация влаги вызвана охлаждением, то значение α возрастает. При этом несконден-

сировавшаяся часть пара обедняется тяжёлыми изотопами. Изотопный состав оставшейся паровой фазы δ_{II} описывается уравнением

$$\delta_{II} = (1/\alpha_0 \alpha) [1/(\epsilon_{FII} + 1) - 1]. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) описывают замкнутую равновесную систему. Если конденсат из паровой фазы выпадает в виде твёрдого материала, изотопного обмена между сублиматом и паровой фазой не происходит. В этом случае изотопный состав конденсата и паровой фазы описывается уравнением Рэля [Dansgaard, 1964].

$$\delta_K = (\alpha/\alpha_0) F_n^{\alpha-1} - 1, \quad (6)$$

$$\delta_{II} = (1/\alpha_0) F_n^{\alpha-1} - 1. \quad (7)$$

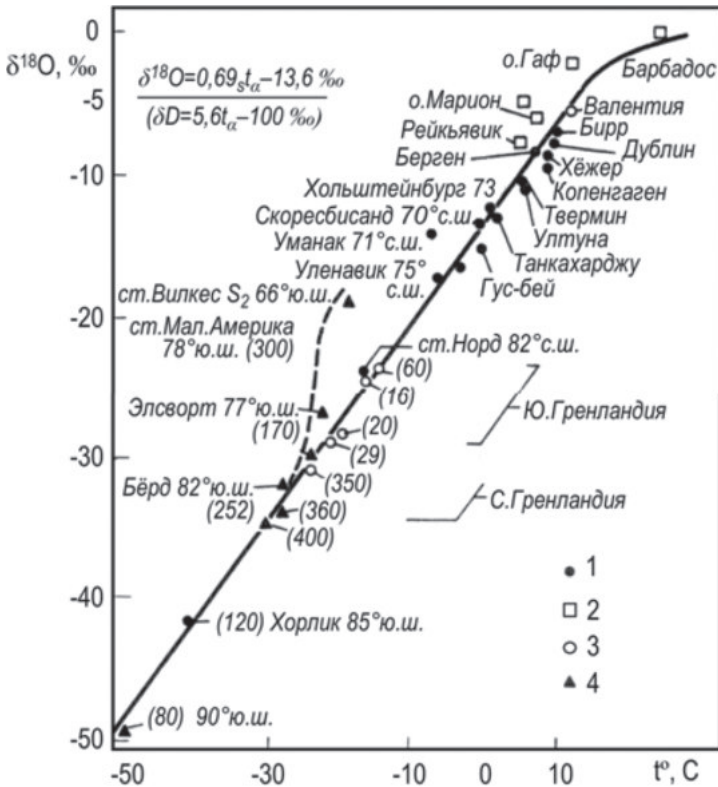


Рис. 2. Среднегодовые значения $\delta^{18}O$ в осадках как функция среднегодовых температур воздуха на поверхности земли: 1 – континентальные станции в районе Северной Атлантики; 2 – островные станции; 3 и 4 – станции Гренландии и Антарктиды. Цифры в круглых скобках обозначают общую мощность (см) исследованных слоев снега [Dansgaard, 1964]

Как видно из уравнений (6) и (7), в данном случае ещё в большей степени происходит обеднение паровой фазы тяжёлыми изотопами в процессе охлаждения системы. Логарифмируя уравнение (7) и дифференцируя по температуре t , можно получить уравнение скорости фракционирования изотопов с изменением температуры $d\delta/dt$. Иными словами, можно получить зависимость концентрации изотопов в осадках от температуры конденсации.

Между концентрацией изотопов кислорода-18 и дейтерия в осадках и среднегодовой температурой воздуха на поверхности t_{Π} экспериментально установлена корреляционная зависимость [Dansgaard, 1964]. Она отмечается в очень широком диапазоне температур и выражается уравнениями:

$$\delta^{18}\text{O}=0,695t_{\Pi}-13,6\%, \quad (8)$$

$$\delta\text{D}=5,6t_{\Pi}-100\%. \quad (9)$$

Зависимость изотопного состава от среднегодовой температуры, выражаемая уравнениями (8) и (9), справедлива лишь для прибрежных районов с умеренным и холодным климатом. С удалением от моря проявляется континентальный эффект. В этом случае расчётные и экспериментальные данные иногда не совпадают. Так, для Вены среднегодовое значение $\delta^{18}\text{O}=-9\%$, а рассчитанное по уравнению (9), исходя из среднегодовой температуры $9,5^{\circ}\text{C}$, значение $\delta^{18}\text{O}=-7\%$ [Drost et al., 1972]. В. Моок [Mook, 1970] отмечает проявление континентального эффекта даже в Голландии.

Среднегодовое значение $\delta^{18}\text{O}$ в осадках различных районов как функция среднегодовой температуры воздуха на поверхности показано на рис. 2 [Dansgaard, 1964].

На основе уравнений (8) и (9) корреляционную зависимость между содержанием дейтерия и кислорода-18 в атмосферных осадках можно записать в общем виде:

$$\delta\text{D}=a\delta^{18}\text{O}+b. \quad (10)$$

При этом значение коэффициента a определяется из соотношения

$$\frac{d\delta\text{D}}{d\delta^{18}\text{O}} = \frac{d\delta\text{D}/dt}{d\delta^{18}\text{O}/dt} = \frac{5,6}{0,69} \approx 8,0.$$

Константа b в уравнении (10) характеризует степень неравновесия системы при испарении первоначальных масс океанической воды, т.е. скорость её испарения. Если бы испарение океанических вод

происходило в равновесных условиях, то константа b была бы равна нулю. Однако за счёт кинетических эффектов при испарении воды в неравновесных условиях образующийся пар обедняется кислородом-18 несколько больше, чем при равновесном испарении. Поэтому $b \neq 0$ для многих станций значение b близко к $+10\%$. Однако в некоторых районах величина b отличается от 10. Так, для Средиземноморья $b=22\%$, для Японского архипелага $b=17,5\%$ [Gat, Carmi, 1970; Sakai, Matsubaya, 1977], для Александрии $b=15,9\%$, Каразимир $b=23,3\%$, Инверсаргилля $b=-0,3\%$ [Yurtsever, Gat, 1981]. Вероятно, на величину параметра оказывают влияние процессы конденсации осадков. Как правило, величина b уменьшается с удалением места выпадения осадков от области зарождения водяного пара (континентальный эффект). Так, для Валентии $b \approx 10\%$, для Вены $b \approx 5\%$, для Москвы $b \approx 0$.

Основной резервуар гидросферы – Мировой океан – содержит около 97% всей воды без учёта связанной в породах. Средняя синоптическая скорость движения воздуха в атмосфере равна 10 м/с, а среднее время влагооборота равно 11 дням. Так что процесс смешения гидросферы протекает весьма интенсивно.

Задача состоит в том, чтобы выяснить, какими величинами изотопных соотношений характеризуется водяной пар, поступающий с поверхности океанов в атмосферу, и как распределяется изотопный состав различных частей пара, из которого формируются осадки, выпадающие над океанами и континентами. В итоге задача сводится к составлению водного и изотопного баланса на генетической основе.

В настоящее время изотопный состав водорода и кислорода атмосферных осадков изучается в глобальном масштабе на сети станций МАГАТЭ/ВМО, расположенных в различных климатических районах земного шара. Эта сеть начала работу в 1961 г. и в разное время насчитывала до 180 станций (рис. 3). Сеть включает островные (сюда входят периодически действующие корабельные станции), прибрежные и континентальные станции. Данные по среднемесячному изотопному составу атмосферных осадков, среднемесячной температуре и влажности для этих станций регулярно публикуются в специальных выпусках МАГАТЭ.

Схема глобального распределения кислорода-18 в атмосферных осадках (рис.4), составленная Ю. Юртсевером и Д. Гатом [Yurtsever, Gat,

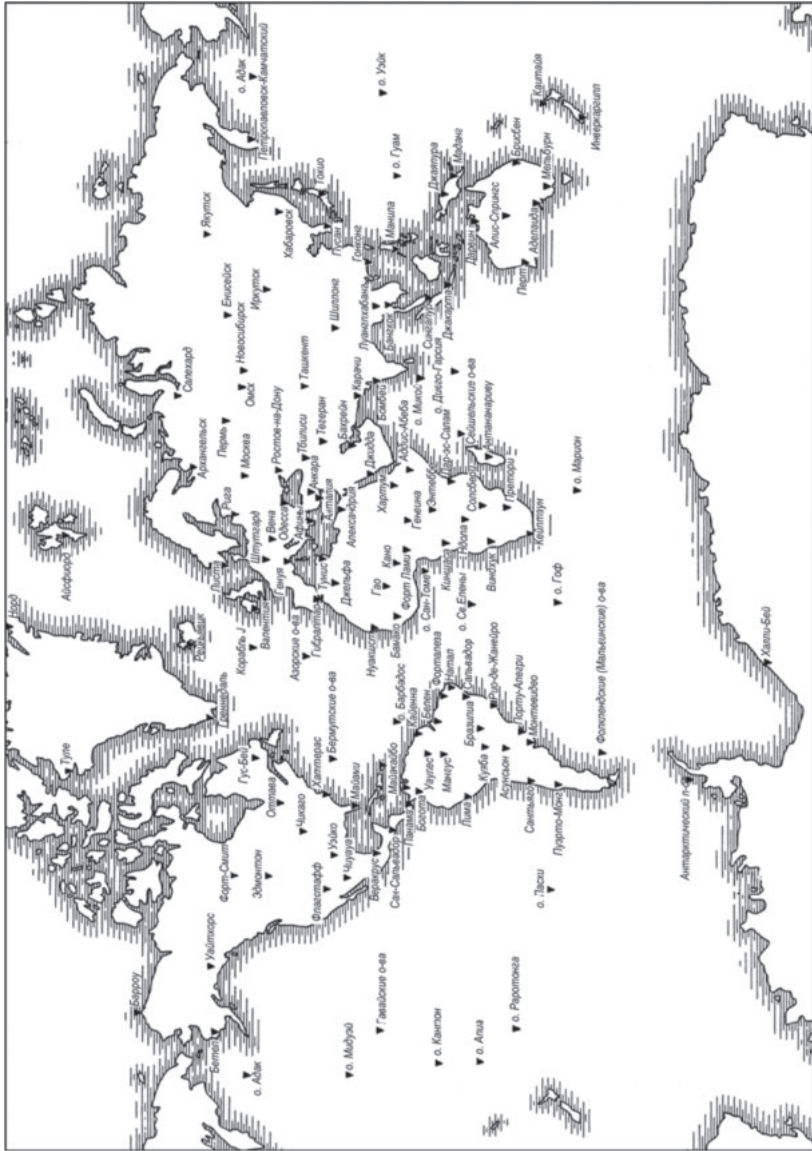


Рис. 3. Сеть станций МАГАТЭ/ВМО для отбора проб атмосферных осадков на 1971 г.

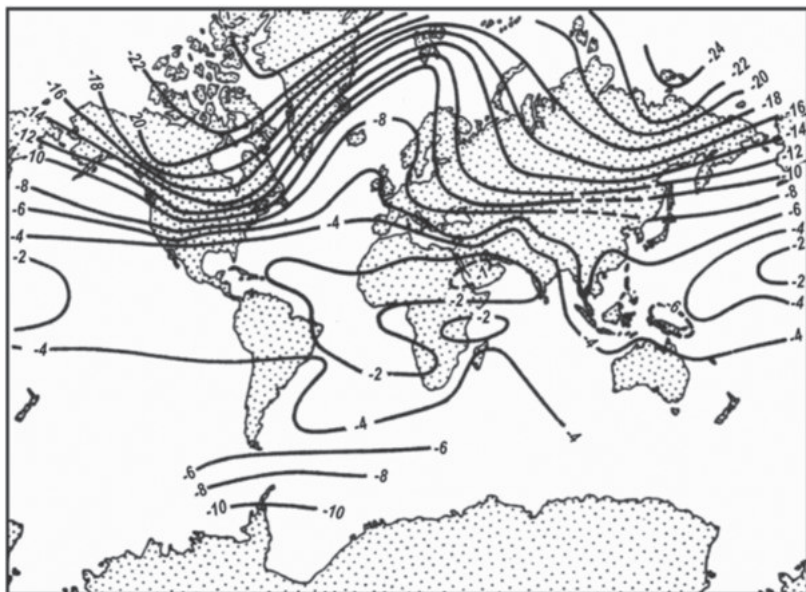


Рис. 4. Глобальное распределение $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках, по данным станций, имевших как минимум двухлетний непрерывный ряд наблюдений

1981] и дополненная нами данными по территории бывшего СССР, даёт общее представление о концентрациях изотопов кислорода в атмосферных осадках без учёта возможных локальных вариаций, связанных с климатическими особенностями отдельных районов.

Глобальная оценка средних изотопных соотношений водорода и кислорода для океанического пара может быть дана из условия баланса испаряющейся и выпадающей в осадках воды. Из материального баланса испарение–осадки вытекает, что $\delta_E = \delta_P$, т.е. при возвращении воды в океаны должен восстанавливаться её прежний изотопный состав. Если рассматривать изотопный баланс океанов в цикле испарение–осадки, то континенты в этом процессе играют незначительную роль, поскольку они получают в виде осадков всего 10% испаряющейся с поверхности океанов воды. В связи с этим Г. Крейг и Л. Гордон [Craig, Gordon, 1965] предложили рассматривать океан как замкнутую систему.

На основании фактических данных о распределении осадков, величины которых коррелируют с площадями широтных поясов,

можно принять следующие величины широтного распределения концентраций ^{18}O :

Широта	Доля осадков	$\delta_{\text{cp}}^{18}\text{O}$, ‰
0–20	0,5	–2
20–40	0,4	–5
40–90	0,1	–15

Используя эти данные, Крейг рассчитал средние величины изотопных отношений для океанического пара и осадков $\delta^{18}\text{O} = -\text{‰}$ и $\delta\text{D} = -22\text{‰}$. Эти цифры близки и для средних континентальных осадков, кроме высоких широт, где указанные величины значительно ниже, но доля осадков этих районов Земли в целом невелика. По данным детальной оценки изотопного водного баланса для Северо-Американского континента [Craig, Gordon, 1965], среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$ и $\delta\text{D} = -30\text{‰}$, что согласуется с принятыми выше значениями.

Если бы испарение с поверхности океанов происходило в равновесных условиях при отсутствии эффектов кинетики и влажности атмосферы, то средние величины изотопных отношений следовало бы принять для $\delta^{18}\text{O} = -9\text{‰}$ и для $\delta\text{D} = -70\text{‰}$, как это указано в работах [Epstein, Mayeda, 1953; Dansgaard, 1964].

Анализируя условия формирования изотопного состава океанических вод, небезынтересно рассмотреть данные об эволюции изотопных отношений во времени на примере антарктических льдов. С. Эпштейном соавторами [Epstein et al., 1970] были исследованы образцы льдов при бурении в 1968 г. скважины на антарктической станции Бёрд ($80^{\circ}01'$ ю.ш., $119^{\circ}31'$ з.д.), расположенной на высоте 1530 м над уровнем моря. Изотопные исследования льда проведены в интервале глубин 99–2162 м при полной глубине скважины 2164 м.

По характеру и величинам изменения изотопных отношений льда во времени авторы следующим образом интерпретируют полученные ими данные. В пределах глубин 1050–2160 м они определённо свидетельствуют о значительных климатических изменениях в прошлом. Соответствующий этим изменениям интервал времени 11 000–75 000 лет назад связывается с известным в палеоклиматологии последним периодом похолодания на Земле в плейстоцене. При этом по изменениям изотопных отношений во времени можно выделить наиболее холодные интервалы, соответствующие 17 000, 27 000, 34 000 и 40 000 лет, и более тёплые, соответствующие 25 000,

31 000 и 39 000 лет назад. Последняя фаза максимального похолодания (отмечена 17 000–11 000 лет назад) совпадает с окончанием Висконсинского оледенения для Северного полушария. Аналогичные совпадения по двум полушариям наблюдаются и для других фаз похолодания и потепления за весь отмеченный период. Данные, характеризующие придонную часть льда, очевидно, являются свидетелями межледникового периода с температурой выше современной для станции Бёрд, который должен был закончиться 75 000 лет назад. Данные, приведенные в работе [Emiliani, 1970], основанные на изучении изотопов кислорода ископаемых пелагических фораминифер, а также на исследовании гренландских льдов по оценке интервалов времени Висконсинского оледенения, близки к приведённым выше. Амплитуда колебания температуры между периодами оледенения и межледниковым временем составляет 7–8°C.

Аналогичные результаты получены Дансгардом с соавторами [Dansgaard et al., 1969] при изучении колонки льда высотой 1390 м из скважины на станции Кемп Сенчури в Гренландии, а также Ф. Г. Гордиенко и В.М. Котляковым [1976] при изучении колонки льда высотой 1000 м, полученной на станции «Восток» в Антарктиде. Однако по данным Гордиенко и Котлякова колебания температуры между голоценовым временем и максимумом плейстоценового оледенения в Антарктиде составляли не 7–8, а лишь 5°C.

На российской станции «Восток» в Антарктиде в период с 1970 по 1998 гг. была пробурена скважина до глубины 3623 м и охватывающая временной интервал от 0 до 420 тыс. лет. Возраст льда в верхней части изучаемой толщи, накопившейся за последние несколько тысяч лет, определяли путём подсчёта годовых слоев. Возраст более глубоких отложений оценивали методом численного моделирования условий растекания льда. В последние годы по мере совершенствования метода ускорительной масс-спектрометрии (АМС) возраст льда определяют по содержанию космогенных радионуклидов ^{14}C , ^{10}Be , ^{36}Cl , ^{26}Al .

Изотопный состав водорода льда в керне со станции «Восток» варьирует в пределах от –420 до –480‰. Более высокие его значения (от –420 до –460‰) отражают сравнительно короткие периоды межледниковых потеплений, а более низкие значения (от –460 до

-480‰) характеризуют длительные периоды ледниковых похолоданий. До настоящего времени это пока единственная в мире скважина, охватывающая последние ледниково-межледниковые циклы: валдайскую или вюрмскую ледниковую эпоху (10–120 тыс. лет назад); микулинское или рисс-вюрмское межледниковье (120–140 тыс. лет); днепровское или рисское оледенение (140–220 тыс. лет); великий межгляциал (220–320 тыс. лет); и окское или миндельское оледенение (320–420 тыс. лет. Установлено, что последняя ледниковая эпоха характеризуется тремя температурными минимумами, которые были 20, 60 и 110 тыс. лет назад. Пик межледниковья приходится на 130 тыс. лет. Изотопные данные свидетельствуют также, что колебания температуры за последние тысячелетия достигли 1,5–2,0°C. Тёплыми были 12, 14 и 20 вв., а холодными – 12–15 и 17–19 вв. Последний интервал получил название малого ледникового периода. Это означает, что палеоклиматические вариации отражают одновременно оба полушария Земли и вероятнее всего являются следствием астрономических эффектов по теории Миланковича.

Изотопный состав естественных и искусственных водоёмов определяется рядом факторов, важнейшие из которых следующие [Gat et al., 1968; Merlivat, 1970; Fontes, 1976]:

1. Изотопный состав и количество атмосферных осадков, за счёт которых происходит непосредственное питание водоёма.
2. Изотопный состав воды поверхностных и подземных источников, а также скорость водопритока.
3. Изотопный состав паров атмосферной влаги и влажность воздуха.
4. Скорость расхода воды, вызываемая оттоком, а также процессы испарения.

Материальный баланс водоёма за время Δt описывается уравнением

$$\Delta V = (\Sigma I - \Sigma Q - E)\Delta t + P, \quad (11)$$

где ΔV – изменение объёма воды; I – составляющая водопритока (поверхностного и подземного); Q – составляющая поверхностного и подземного расхода воды; E – средняя скорость испарения; P – количество осадков, выпавших за время Δt .

В этом случае уравнение изотопного баланса будет иметь вид:

$$R_L \Delta V + V \Delta R_L = (\Sigma R_I I - \Sigma R_Q Q - R_E E)\Delta t + R_F P, \quad (12)$$

где R – средние значения изотопных отношений в составляющих притока и расхода воды.

В уравнении (12) можно заменить значение R на δ и оно примет вид:

$$\Delta(\delta_L V_L) \Delta t = \Sigma \delta_I I - \Sigma \delta_Q Q - \delta_E E + \delta_F F. \quad (13)$$

Как известно [Craig, Gordon, 1965; Merlivat, 1970], скорость испарения жидкости в атмосферный воздух может быть описана уравнением $E = k(dC/dz)$, где E – скорость испарения (поток пара с единицы поверхности жидкости) k – коэффициент турбулентной диффузии; dC/dz – вертикальный градиент влажности.

Для изотопических разновидностей воды ($H_2^{18}O$ или HDO) имеем соответственно $E_i = k_i(dC_i/dz)$. Значение изотопных соотношений в паре R_E в этом случае можно записать в виде:

$$R_E = \frac{k_i}{k} \frac{R_L/a - hR_a}{1-h}, \quad (13)$$

где h – относительная влажность воздуха на высоте z от поверхности воды при заданной температуре; R_L и R_a – отношения изотопов в жидкости и атмосферном паре; a – коэффициент равновесного фракционирования.

В формуле (13) принято $\Delta C = 1-h$, $\Delta C_i = R_i/a - hR_a$. Обозначим $k/k_i = k$, тогда уравнение (13) примет вид [Gat et al., 1968]:

$$R_E = (R_L/a - hR_a)/k(1-h). \quad (14)$$

Формулы (13) и (14) позволяют судить о параметрах, которые определяют изотопный состав потока пара. Как отмечает В.С. Брезгунов [1978], эти формулы имеют реальный физический смысл лишь в том случае, когда оба потока имеют одинаковый знак, т.е. происходит испарение или конденсация воды и изотопических разновидностей молекул. Если потоки имеют различные знаки, то при оценке водного и изотопного баланса водоёмов их следует рассматривать самостоятельно.

Дополнительное, по сравнению с равновесным, фракционирование изотопов при испарении воды в атмосфере с относительной влажностью h , определяемое влажностью и параметрами турбулентной диффузии изотопных разновидностей молекул пара, Крейг и Гордон [Craig, Gordon, 1965] выражают через величину $\Delta \epsilon = -(k/k_i - 1)(1-h)$. При таком подходе выражение для изотопного состава потока испарения примет вид [Craig, Gordon, 1965]

$$\delta_E = \frac{\alpha^* \delta_L - h \delta_a - \epsilon^* - \Delta \epsilon}{(1-h) + \Delta \epsilon}, \quad (15)$$

где $\alpha^* = 1/\alpha$, $\epsilon^* = 1 - 1/\alpha$; δ_L , δ_a – изотопный состав жидкости и пара.

Выражение (15) удобно использовать при составлении уравнений изотопного баланса водоёмов. Для точного определения величины δ_E необходимо знать параметры δ_L , δ_a и h , которые поддаются прямым измерениям, а также величины ϵ^* и $\Delta \epsilon$. Значение ϵ^* можно рассчитать по величинам равновесных коэффициентов фракционирования изотопов при заданных температурах. Величина $\Delta \epsilon$ оценивалась в ряде экспериментальных и теоретических работ, что подробно рассмотрено в обзоре [Брезгунов, 1978]. По экспериментальным данным, значение $\Delta \epsilon_{18O}$ зависит от влажности как $\Delta \epsilon_{18O} = (1-h)16\%$.

При постоянной влажности отношение $\Delta \epsilon_D / \Delta \epsilon_{18O}$ по экспериментальным данным и теоретическим расчётам, составляет от 0,5 до 0,05 [Craig, Gordon, 1965; Merlivat, 1970]. Однако в ряде экспериментов $\Delta \epsilon_D$ превосходит $\Delta \epsilon_{18O}$ в 2–4 раза [Craig, Gordon, 1965; Gat, 1970]. Такое отклонение опытных и теоретических значений Крейг и Гордон связывают с дополнительным изотопным эффектом на границе жидкость – пар, который может быть обусловлен различием коэффициентов конденсации (испарения) для изотопических разновидностей молекул. Значение параметра $k = \kappa/\kappa_i$ в уравнении (14), по экспериментальным данным, варьирует в пределах 1,016–1,020 для кислорода-18, а для дейтерия эта величина несколько меньше и составляет от 1,009 до 1,0136 [Merlivat, 1970].

Как следует из уравнения (13), изотопный состав пара над водоёмом в различных условиях определяется как изотопным составом испаряющейся воды, так и содержанием изотопов в атмосферной влаге. Если бы в природных условиях испарение происходило по закону рэлеевской дистилляции, то вода и пар в любой момент времени находились бы в состоянии изотопного равновесия. В этом случае состав пара над водоёмом был бы равен $R_E = R_L/\alpha$ (где R_L – изотопный состав водоёма ко времени t), а изотопный состав воды при сокращении объёма водоёма в процессе испарения воды описывался бы формулой Рэлея [Бродский, 1957]

$$R_L = R_0(V_0/V)^{\alpha-1/\alpha} = R_0(V/V_0)^{\alpha-1/\alpha}, \quad (16)$$

где R_0 и R_L – соотношение изотопов воды в водоёме при $V=V_0$ и после сокращения его объёма; V_0 и V – начальный и конечный объём воды..

При равновесном испарении значение $\delta_L - \delta_0$ является линейной функцией $\ln F$. Если же при условиях равновесного процесса испарения объём водоёма остается постоянным за счёт водопритока, то изотопный состав воды в любой момент следует из уравнения [Брезгунов, 1957]

$$\ln \alpha [(\alpha-1)/(\alpha-R_0/R_L)] = V/V_0. \quad (17)$$

В случае неравновесных условий испарения, когда вступает в действие кинетический фактор (при 20°C $\alpha_D^k=1,09$; $\alpha_{18\text{O}}^k=1,025$), имеем

$$d\delta\Delta/d\delta^{18}\text{O} \approx (\alpha_D^k - 1) \alpha_{18\text{O}}^k / (\alpha_{18\text{O}}^k - 1) \alpha_D^k < 8. \quad (18)$$

В стационарных условиях, когда не происходит значительных изменений объёма водоёма, изотопный состав воды при условии хорошего перемешивания стремится к постоянной величине

$$R_L = \frac{(1-h)R_1s + hR_a/k}{1/\alpha k + (1-h)(1-s)}, \quad (19)$$

где s – отношение средних скоростей водопритока и испарения.

Выражение (19) справедливо, если кратковременные изменения параметров α , R_1 , R_a позволяют принять их средние величины постоянными во времени.

Если положить, что вода из водоёма теряется только за счёт испарения, т.е. $s=I/E=1$, то уравнение (19) примет вид

$$R_L = \alpha^k [(1-h)R_1 + h(R_a/k)]. \quad (20)$$

Если объём водоёма при испарении уменьшается, и при этом вода расходуется только на испарение и новых порций воды в водоём не поступает ($I=0$), то интегрирование уравнений (11) и (12) при таких условиях даёт выражение для изотопного состава водоёма как функции V/V_0 :

$$R_L = \frac{[R_0(1/\alpha k - 1 + h) - hR_a/k](V/V_0)^{(1/\alpha k - 1 + h)/1 - h} + hR_a/k}{1/\alpha k - 1 + h}. \quad (21)$$

Уравнение (21) по структуре сходно с формулой рэлеевской дистилляции (16). Однако в данном случае учитывают кинетические факторы, влажность воздуха и изотопный состав пара атмосферной

влаги. В пересыхающих водоёмах, когда $(V/V_0) \rightarrow 0$, конечный изотопный состав воды может быть найден из выражения

$$R_L = \frac{hR_\alpha/k}{1/ak - 1 + h}. \quad (22)$$

В реальных условиях испарения при сохранении объёма водоёма изотопный состав оставшейся части жидкости не возрастает беспредельно, как это следует из уравнения Рэля (16), а стремится к стационарному состоянию, определяемому параметрами α , k , h и R_α .

Примером взаимосвязи озёрных вод с источниками их питания и атмосферным водяным паром является распределение изотопов водорода и кислорода в бассейне бессточного озера Иссык-Куль [Брезгунов и др., 1979]. Озеро расположено в высокогорной впадине Тянь-Шанской горной системы на высоте 1600 м над уровнем моря. Его площадь составляет 6200 км² при средней глубине 280 м. В озеро впадает свыше 50 рек, стекающих с окружающих склонов гор и питающихся главным образом талыми водами ледников. Годовой сток рек составляет 4 км³, а среднее количество годовых осадков составляет 250 мм (~1,5 км³). Температура поверхностных вод озера в июле–августе равна 18–19°C, а в январе–феврале она не падает ниже +2°C.

В силу расположения Иссык-Кульской котловины общей площадью 22 000 км² с её незамерзающим озером, эту котловину можно рассматривать в качестве уникальной природной модели, в пределах которой проявляется большинство наблюдаемых закономерностей распределения стабильных изотопов водорода и кислорода, характерных для глобального кругооборота природных вод.

В.С. Брезгунов с соавторами, начиная с 1974 г., проводили систематические исследования изотопного состава озёрной и речной воды, источников подземных вод, атмосферных осадков, ледников и водяного пара котловины. На основе анализа данных об изотопном составе атмосферных осадков и водяного пара над озёрами были найдены пропорции смешения водяного пара верхних слоёв атмосферы, приносимого извне и местного «озёрного» водяного пара. Было найдено, что в западной части котловины (ст. Рыбачье) атмосферные осадки практически полностью формировались из внешнего регионального водяного пара. Осадки восточной части котлови-

ны (ст. Пржевальск) содержали 20% озерного и 80% регионального пара. Максимальная доля озёрного пара (до 40%) отмечена в центральной части котловины у станций Чолпон-Ата, Покровка и Большая Кызылсу.

Изменение изотопного состава речных вод за счёт испарения можно наблюдать на примере Нила [Friedman et al., 1964]. Относительное содержание дейтерия в период паводка в речной воде у Хартума составляло – 23‰, у Каира 21‰. В меженьный период эти величины соответственно равнялись +1,5‰ и +1,6‰. Отсюда следует, что на отрезке между Хартумом и Каиром (около 3000 км) Нил теряет на испарение около 3% своей воды.

Заметное обогащение грунтовых вод дейтерием и кислородом-18 за счёт испарения атмосферных осадков в процессе инфильтрации через зону аэрации наблюдается главным образом в районах с аридным климатом [Dinzer et al., 1974; Gonfiantini et al., 1976]. Изменение изотопного состава подземных вод за счёт обменных реакций в системе вода–порода для вод зоны активного водообмена практически не наблюдается.

На основе анализа изотопного состава зоны активного водообмена нашли решение такие практические задачи как: сезонное питание подземных вод; питание подземных вод в эпоху оледенения; выявление областей питания подземных вод; взаимосвязь водоносных горизонтов; оценка пропорций смещения вод различного генезиса; временные параметры водообмена в водоносной системе; исследование водного баланса сопряжённых гидрогеологических бассейнов.

С использованием природных концентраций дейтерия и кислорода-18 решались и другие гидрогеологические проблемы, такие как: выявление сезонности питания подземных вод и расчёт доли питания за счёт атмосферных осадков различных сезонов года в карстовых регионах [Dinzer, Payne., 1971]; исследование движения подземных вод в районах действующих водозаборов [Fritz et al., 1974]; идентификация поступления в водоносные горизонты современных и древних морских вод, что характерно для прибрежных районов [Salati et al., 1974; Yurtsever, Payne., 1979]. Наиболее достоверные результаты удается получить при комплексном использовании различных природных изо-

Таблица 2

Распределение дейтерия и кислорода-18 в подземных водах территории бывшего СССР

Район исследования	$\delta D, ‰$	$\delta^{18}O, ‰$	Источник
Прибалтийский	-119 до -48	-18,8 до -6,3	Пельмегов и др., 1978
Припятский прогиб	-95 до +2	-12,7 до +4	Ткачук и др., 1975
Украинские Карпаты	-108 до -7	-13,1 до +3	Бабинец и др., 1971 Ветштейн и др., 1972 Поляков и др., 1974
Прикарпатские минеральные воды «Нафтуся» и «Шкло»	-102 до -6	-	Ветштейн и др., 1973
Днепроовско-Донецкий	-55 до +11	-7,2 до +0,3	Ветштейн и др., 1973
Прикаспийская впадина (северо-западный борт)	-107 до -33	-10,1 до -2,4	Алексеев и др., 1975
Предкавказье	-67 до -15	-12 до +5,8	Тарасов, 1978
Азово-Кубанский	-120 до -28	-17,7 до +7	Соколовский и др., 2007
Кавказские минеральные воды	-118 до -42	-12,7 до +1,1	Селецкий и др., 1973
Сочи-Адлерский	-73 до -35	-9,8 до -0,5	Горбушина и др., 1972, 1974
Средне-Каспийский	-125 до -17	-12,4 до -2,2	Селецкий и др., 1973
Западно-Туркменский	-79 до -4	-13,4 до +4,4	Селецкий и др., 1973 Алексеев и др., 1975
Ясханская линза пресных вод	-89,2 до -54,4	-12,4 до -2,5	Селецкий и др., 1973
Грязевые вулканы Западной Туркмении	-57 до -31	-	Селецкий и др., 1973
Северный Кавказ	-115 до -28	-14,2 до +5	Алексеев и др., 1975
Московский	-114 до -22	-14,5 до -5	Соколовский и др., 1999
Ферганский	-106 до -78	-10,9 до +1,7	Селецкий и др., 1973
Амударьинский	-102 до -20	-12,3 до -6,1	Алексеев и др., 1974, 1975
Сибирская платформа	-180 до -23	-21,5 до 0,0	Пиннекер и др., 1973, 1974, 1975

топов в комбинации с гидрохимическими и гидрогеологическими данными.

Формирование глубоких подземных вод осадочной оболочки Земли имеет длительную и сложную историю. Глубокие воды седиментационных бассейнов формировались на месте древних морей и лагун, тяготеющих к материковым окраинам. Наблюдается непосредственная связь мощности осадочных толщ с тектоническими горизонтальными подвижками литосферных плит [Де Пишон и др., 1977; Буллард, 1978] и как следствие этого процесса – с вертикальными тектоническими подвижками земной коры [Ферхуген и др., 1974].

Главные бассейны седиментации, образовавшиеся в различные геологические эпохи, были связаны с окраинными частями плит, т.е. с теми участками земной коры, где происходили максимальные тектонические вертикальные подвижки. Характерно, что подавляющее число открытых к 1970 г. нефтяных месторождений-гигантов связано с осадочными бассейнами, расположенными в шельфовых зонах современных материков [Муди, 1978].

Многими исследователями проведены значительные работы по изучению распределения дейтерия и кислорода-18 в глубоких подземных водах территории бывшего СССР. Результаты этих исследований в обобщённом виде представлены в табл. 2. Аналогичные исследования выполнены для большинства нефтегазовых провинций мира.

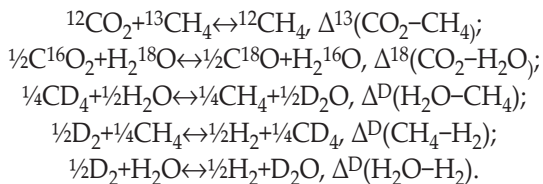
Большой интерес у исследователей вызывает изучение изотопного состава водорода и кислорода кремнистых сланцев, которые представляют собой силикатную породу, практически целиком состоящую из SiO_2 .

Важную роль в эволюции изотопного состава гидросферы играли карбонатные осадки биогенного и неорганического происхождения. Изучение изотопного состава карбонатных пород необходимо для решения ряда важных проблем. После установления изотопной температурной шкалы, полученной Эпштейном с соавторами [Epstein et al., 1951; 1953; Bowen, 1991] и основанной на изотопном равновесии кислорода при формировании карбонатов в воде, в разных странах начались палеотемпературные исследования древних морей, в которых происходило образование карбонатных пород.

Многие организмы отлагают известковые скелеты в изотопном равновесии с морской водой, однако изотопный состав раковин некоторых морских организмов контролируется также кинетическими факторами, связанными с процессами метаболизма [O'Neil, 1979]. В частности, многочисленными экспериментами доказано [Боуэн, 1969; Savin, 1977], что многие моллюски и фораминиферы, панцири которых используются в палеотемпературном анализе, строят свои карбонатные оболочки в состоянии изотопного равновесия с морской водой.

По результатам изучения изотопного состава подземных вод геотермальных областей различных районов мира, таких как Лардерелло (Италия), Вайракей (Новая Зеландия), Гекла (Исландия), Карупано (Венесуэла), Йеллоустонский и Лассенский национальные парки, Стимбоут-Спринг, Солтон-Си (США), Курило-Камчатский регион (РФ) и другие, установлено, что в составе термальных вод доминируют метеорные воды. Если бы термальные воды содержали существенную долю ювенильной воды, то не наблюдалось бы различия в их изотопном составе, а их состав был бы независимым от географического положения исследуемых вод. В данном же случае различия в изотопном составе исследуемых термальных и поверхностных вод того же местоположения говорит о тесной генетической связи термальных вод с метеорными.

В соответствии с реакцией Фишера–Тропша, в гидротермальных системах должны протекать следующие реакции изотопного обмена:



Здесь Δ означает различие в изотопном составе компонентов А и В, $\Delta = \delta A - \delta B \approx 10^3 \ln \alpha$.

В работах [Panichi et al., 1977, 1979] для вычисления базовых температур по изотопному составу водяного пара, воды и растворенных газов были использованы следующие уравнения:

$$\Delta^{\text{D}}(\text{CH}_4 - \text{H}_2) 10^3 \ln \alpha = -90,888 + 181,269(10^6/T^2) - 8,949(10^{12}/T^4);$$

$$\begin{aligned} \Delta^D(\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2)10^3\ln\alpha &= -201,6+391,5(10^3/T)-12,9(10^6/T^2); \\ \Delta^{13}(\text{CO}_2-\text{CH}_4)10^3\ln\alpha &= -9,01+15,301(10^3/T)-2,361(10^6/T^2); \\ \Delta^{18}(\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}_{\text{пар}})10^3\ln\alpha &= -10,55+9,289(10^3/T)-2,659(10^6/T^2); \\ \Delta^{18}(\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}_{\text{жидкость}})10^3\ln\alpha &= -3,37+4,573(10^3/T)-2,708(10^6/T^2). \end{aligned}$$

Геотермометры $\Delta^{13}(\text{CO}_2-\text{CH}_4)$, $\Delta^D(\text{CO}_2-\text{CH}_4)$ и $\Delta^D(\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}_{\text{пар}})$ показали базовые температуры геотермальной системы, равные 341 ± 37 , 314 ± 30 и $254\pm 25^\circ\text{C}$ соответственно. Эти значения превосходят температуру, непосредственно измеренную на выходе из скважины ($216\pm 25^\circ\text{C}$). Геотермометр $\Delta^{13}(\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2)$ в силу быстрого установления изотопного равновесия практически фиксирует температуру воды на выходе из скважины. Геотермометр $\Delta^D(\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4)$ даёт трудно сопоставимые температуры, что объясняется медленным установлением изотопного равновесия в системе вода-метан, а также протеканием побочных реакций, сопровождающих реакцию изотопного обмена.

Космогенные изотопы гидросферы

Основная роль при образовании космогенных радиоактивных изотопов принадлежит космическим лучам. Познание природы космических лучей, а также процессов, происходящих при их взаимодействии с внешней геосферой, сыграло немаловажную роль в развитии наук о Земле. В частности, решение многих гидрологических задач, связанных с динамикой природных вод, их генезисом и возрастом, стало возможным в результате изучения распределения в геосферах космогенных радиоактивных нуклидов, т.е. изотопов, генерируемых космическими лучами. В практике исследования космических лучей известны случаи регистрации частиц галактического происхождения с энергией $10^{19}-10^{20}$ эВ.

В состав космических лучей входит около 90% протонов, 9% ядер гелия (α -частиц) и 1% приходится на долю всех остальных ядер. В табл. 3 приведены данные об относительной распространенности ядер в Солнечной системе, в космическом пространстве и в космических лучах [Webber, 1967].

В области изучения состава первичных космических лучей, за исключением водорода и гелия, сделано мало. Расчёты, выполненные для оценки относительной распространенности изотопов углерода, показывают, что для первичных космических лучей $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}\approx 1$.

Таблица 3

Распространенность ядер в Солнечной системе, космическом пространстве и первичных космических лучах относительно углерода [Webber, 1967]

Элемент	Распространенность		
	Солнечная систем	Космическое пространство	Первичные космические лучи
He	?	400	38
Li	$\ll 0,001$	$\ll 0,001$	0,27
Be	$\ll 0,001$	$\ll 0,001$	0,19
B	$\ll 0,001$	$\ll 0,001$	0,43
C	1,0	1,0	1,0
N	0,16	0,27	0,46
O	1,7	2,3	0,61
F	$\ll 0,001$	$\ll 0,001$	0,09
Ne	?	0,80	0,18
Na	0,004	0,006	0,08
Mg	0,005	0,12	0,15
Al	0,004	0,005	0,03
Si	0,063	0,13	0,11
P	–	0,002	0,01
$16 \leq Z \leq 19$	0,050	0,02	0,02–0,05
Ca	–	$\ll 0,001$	0,026
Ti	–	0,006	0,017
Cr	–	0,06	0,030
Fe	–	0,06	0,080
Ni	–	0,008	0,015
$Z > 20$	–	$\ll 0,001$	0,01
$Z > 30$	–	$\sim 0,001$	$< 0,004$

Измерениями с помощью фотоэмульсий также получено значение, близкое к единице.

Надежные измерения содержания дейтерия в первичных космических лучах отсутствуют. В верхних слоях атмосферы (для глубины атмосферы в 2–4 г/см²) измеренное значение ${}^2\text{H}/{}^1\text{H} = 0,05\text{--}0,12$. Большое расхождение объясняется тем, что измерения проведены для разных интервалов энергий частиц и на разных широтах. Но эти данные не противоречат спутниковым результатам (${}^2\text{H}/{}^1\text{H} = 0,06$ или $\epsilon = 25\text{--}80$ МэВ/нукл), где эффекты земного магнетизма и атмосферы исключены.

Отношение распространенности дейтерия к распространенности протонов во Вселенной – порядка $1,4 \cdot 10^{-4}$ [Webber, 1967], причём малую распространенность дейтерия объясняют его распадом.

В атмосфере Солнца, согласно спектроскопическим исследованиям, отношение ${}^2\text{H}/{}^1\text{H}$ также мало и составляет $4 \cdot 10^{-5}$ [Kinman, 1956]. И только в атмосфере магнитных звёзд оно увеличивается до 10^{-2} . Отношение распространенности ${}^2\text{H}/{}^1\text{H} = 10^{-5} \rho$, где ρ (част./см³) – средняя плотность вещества, через которое прошли космические лучи [Singer, 1958].

При изучении изотопного состава гелия в космических лучах [Appa Rao, 1962] получено отношение ${}^3\text{He}/({}^3\text{He}+{}^4\text{He}) = 0,20-0,30$ для интервала энергий $\epsilon = 160-360$ МэВ/нукл. Попытки измерить это отношение для более высоких энергий положительного результата не дали.

Известны четыре вида вариаций космических лучей во времени [Fireman, 1967].

1. Вариации, связанные с 11-летним циклом солнечной активности. При этом с увеличением потока солнечных частиц интенсивность галактического излучения падает.

2. Гелиоцентрическое изменение потока галактических лучей, радиальный градиент которого в пределах 1,0–1,5 астрономических единиц (1 а.е. $\approx 1,5 \cdot 10^8$ км) составляет +9,6% на 1 а.е.

3. Вековые вариации излучения, обнаруженные по изменению содержания ${}^{14}\text{C}$ в атмосфере в различные эпохи. Они установлены по изменению содержания ${}^{14}\text{C}$ в годичных кольцах деревьев разного возраста.

4. Спорадические потоки ядерных частиц низкой энергии, выбрасываемые при солнечных вспышках.

Среди природных радиоактивных изотопов тритий привлекает наибольший интерес исследователей, занимающихся изучением закономерностей движения воды в природе. Тритий непосредственно входит в состав молекул воды и поэтому является её идеальным индикатором. Большое внимание к использованию трития для гидрологических и метеорологических целей особенно после испытания термоядерного оружия, когда в атмосферу было выброшено большое количество искусственно образованного изотопа. Этот бомбогенный тритий, поступавший в атмосферу в виде отдельных порций после каждого ядерного взрыва, являлся своего рода временной меткой воды, участвующей в круговороте.

Образование трития идёт при взаимодействии нейтронов средних энергий с ядрами ^{14}N и при расщеплении ядер ^{14}N и ^{16}O протонами с энергией более 100 МэВ (табл. 4).

Равновесное количество трития, генерируемого космическими лучами, составляет от 3 до 10 кг. Основная часть этого количества (~93%) содержится в гидросфере и лишь 7% – в атмосфере. Ввиду ничтожно низких концентраций трития, наблюдаемых в природных объектах, его принято выражать в тритиевых единицах (ТЕ). Эта единица соответствует содержанию одного атома трития на 10^{18} атомов протия, что эквивалентно 7,2 распадам в минуту на 1 кг воды, или 0,119 Бк/кг. Тритий – мягкий β -излучатель с максимальной энергией β -частиц, равной 18 кэВ, и периодом полураспада 12,32 года. Конечным продуктом распада трития является стабильный изотоп гелия ^3He .

Таблица 4

Реакции образования трития космическими лучами в атмосфере

Реакция	Энергия частиц, МэВ	Сечение реакции, мбарн	Скорость образования, ат./см ² , с
$^{14}\text{N}(n, ^3\text{H}) ^{12}\text{C}$	>4,4	11 ± 2	0,1–0,2
$^{16}\text{O}(p, ^3\text{H}) ^{14}\text{O}$	>100	25	0,08
$^{14}\text{N}(p, ^3\text{H}) ^{12}\text{N}$			
$^{16}\text{O}(p, ^3\text{H}) ^{14}\text{O}$	10–100	–	0,01
$^{14}\text{N}(p, ^3\text{H}) ^{12}\text{N}$			
$^{14}\text{N}(p, ^3\text{H}) ^{12}\text{N}$	<10	–	0,05
$\text{N}, \text{O}(\gamma, ^3\text{H})$	–	–	10^{-5}

Вскоре после образования тритий окисляется и дает молекулу воды НТО. Так как массы протия и трития различны, то при переходе воды от газообразного состояния к твердому и обратно происходит фракционирование изотопов.

До первых термоядерных испытаний в атмосфере (1952 г.) основным источником поступления трития в природе было его образование за счёт космических лучей. К этому времени было произведено экспериментальное определение содержания природного трития всего в нескольких пунктах на Земле. Позднее, когда были установлены определенные закономерности распределения и выпадения на Земле соответствующих концентраций трития, стало ясно, что его содержание колеблется в значительных пределах как в про-

странстве, так и во времени. Этот предел для обоих полушарий может быть оценен в 0,1–10 ТЕ при средней скорости образования трития примерно в 30 ат./см²·мин относительно земной поверхности [Suess, 1969].

Метеоритная составляющая трития на земной поверхности ничтожно мала и составляет менее 10⁻⁵ат./см²·с. Близкими к метеорным данным оказались результаты измерения трития в лунных породах, которые были доставлены космическими аппаратами Аполлон-11 и Аполлон-12. Его концентрации составили 270–300 расп./мин·кг [Bochaler et al., 1971]. В лунных породах и метеоритах образование трития идёт при реакциях скалывания взаимодействующих протонов высоких энергий с ядрами пороодообразующих элементов Fe, Si, Al и др.

Другим источником поступления трития в атмосферу явились термоядерные испытания, которые начались в 1952 г. Выход трития при термоядерном взрыве оценивается от 0,7 до 5 кг на мегатонну термоядерного синтеза и 0,07 кг на мегатонну при реакциях деления [Miskel, 1973].

Первые высотные взрывы мегатонной мощности были произведены США в 1958 г. на высоте 4–7,5 км. Англия в 1957–58 гг. на меньшей высоте произвела восемь мегатонных взрывов. Часть трития от этих взрывов попала в стратосферу. Наиболее мощные мегатонные взрывы были произведены в 1961–62 гг. США и СССР в различных точках земного шара и на большой высоте. В результате в стратосфере накопилось до 400 кг трития, а его концентрация в осадках в отдельных пунктах Земли в весенне-летние месяцы достигала 10 000 ТЕ [Thatcher, Raune, 1965]. Как было выявлено в последующие годы после моратория о запрещении ядерных испытаний в трёх сферах, время пребывания трития в стратосфере, принятое по предыдущим оценкам за один год, оказалось неточным. Его концентрации в атмосферных осадках снижаются до сих пор и значительно медленнее, чем это предполагалось по расчёту. Некоторое повышение содержания трития в атмосфере наблюдалось за счёт термоядерных взрывов, производившихся Францией и Китаем. Однако величины этих тритиевых поступлений по сравнению с предыдущими незначительны.

Источником поступления трития в окружающую среду являются также предприятия атомной промышленности (энергетические

и исследовательские реакторы, заводы по переработке ядерного горючего и др.). Выход трития при делении урана в различных типах реакторов зависит от вида используемого горючего, от энергетического спектра нейтронного потока и от ряда других эксплуатационных факторов. В зависимости от типа реактора тритий образуется в результате активации нейтронами бора, лития и дейтерия. В контролируемом термоядерном реакторе, над которым в настоящее время ведутся работы, тритий будет основным радионуклидом. Большая часть трития, попадающего из атомных установок в окружающую среду, в этом случае оказывается в газообразной форме (HT , DT , T_2) и частично в жидкой фазе в виде НТО. Газообразный тритий, попав в атмосферу, быстро окисляется, образуя молекулы воды.

По данным, приведенным в работе [Sehgal, Rempert, 1971], при делении урана и плутония выход трития на каждые 10^4 актов деления составляет для ^{235}U 0,8 атомов, для ^{238}U – 0,9 атомов и для ^{239}U – 1,8 атомов. М. Фласс и Н. Дьюди [Fluss, Dudey, 1971] исследовали зависимость выхода трития при делении ^{235}U от энергии нейтронов. По их данным, при изменении энергии нейтронов от 175 до 630 КэВ выход трития на 10^4 актов распада урана составляет от 2 до 3,4 атомов.

При делении ^{235}U тепловыми нейтронами выход трития составляет $8,7 \cdot 10^{-3}$ [Taylor, Peters, 1972] и при делении быстрыми нейтронами – $2,2 \cdot 10^{-2}$ [Dudey et al., 1972]. Такая эффективность выхода соответствует образованию трития для реакторов типа ВВР и РМБК в количестве $1,1 \cdot 10^{-2}$ Ки/сут·Мвт (т) и для реакторов на быстрых нейтронах – $2,8 \cdot 10^{-2}$ Ки/сут·Мвт (т) [Голубев и др., 1979; Бродер и др., 1979].

При реакциях на боре, который содержится в управляющих стержнях реакторов, тритий выделяется по реакциям $^{10}\text{B}(\alpha, 2\alpha)^3\text{H}$; $^{11}\text{B}(n, ^3\text{H})^9\text{B}$; $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}(n, n\alpha)^3\text{H}$. Сечения взаимодействия этих реакций возрастают с ростом энергии нейтронов. Поэтому выход трития в реакторах на быстрых нейтронах значительно выше, чем в других типах реакторов. По данным [Lokante, 1971], для водо-водяного реактора мощностью 3500 МВт выход трития от реакций деления за год составил 11 000 Ки и от реакций на боре – 3900 Ки. Выход трития из тепловыделяющих элементов в теплоноситель существен-

но зависит от материала оболочки. Оболочка из нержавеющей стали пропускает до 60–80% образовавшегося трития, а циркониевая оболочка – лишь 0,1% [Lokante, 1971].

К настоящему времени общее количество трития на Земле оценивается величиной от 50 до 150 кг. Следовательно, роль космогенного трития в формировании изотопного состава природных вод остаётся незначительной.

В гидрологическом цикле источником трития является стратосфера, а резервуаром для его стока – глубокие подземные воды, глубинные океанические воды и многолетние ледники, где происходит его радиоактивный распад. Отсюда следует ожидать, что должны наблюдаться определённые закономерности распределения трития во всех звеньях гидросферы.

Помимо воды, которая является основным объектом исследований распределения трития на Земле, существуют ещё два водородсодержащих соединения – молекулярный водород H_2 и метан CH_4 . Концентрация молекулярного водорода в промышленных районах в настоящее время составляет $0,575 \cdot 10^{-6}$ для Северного полушария и $0,550 \cdot 10^{-6}$ для Южного [Schmidt, 1974]. В глобальном масштабе 50% молекулярного водорода имеет антропогенное происхождение. Наиболее мощным естественным источником H_2 являются биохимические процессы, происходящие в океанах, при которых вода втрое пересыщается водородом. Значительный вклад в образование H_2 дают процессы диссоциации молекул воды и фотосинтеза водорода, происходящие в атмосфере [Романов, Кикичев, 1979].

Из трития, образованного космическими лучами, лишь 0,1% находится в форме НТ и 99,9% – в форме НТО. Основное количество молекул НТ образуется на высоте 10–40 км. При взрыве термоядерного устройства, кроме выброса трития, имеющегося в самом устройстве, основной реакцией образования трития является $D+D \rightarrow T+H+4 \text{ МэВ}$.

Природный тритий используют в качестве индикатора для изучения закономерностей циркуляции воздушных масс в атмосфере, образования атмосферных осадков и формирования поверхностного и подземного стока воды на континентах. Для этих целей подходят фактические экспериментальные данные многолетних наблюдений за выпадениями трития в атмосферных осадках в глобальном

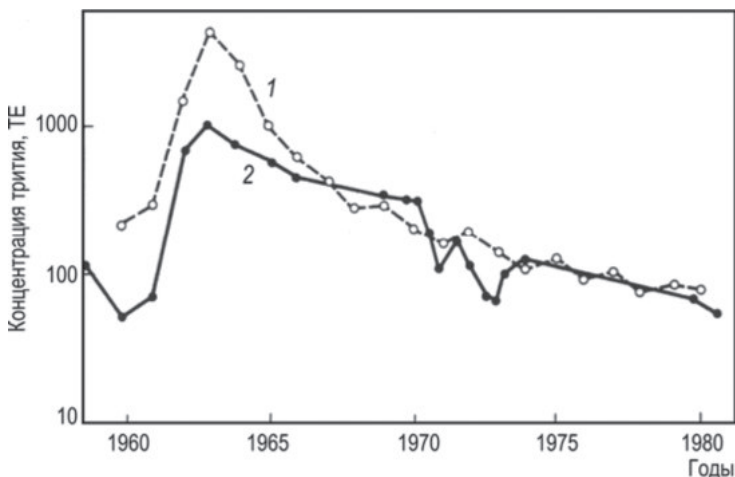


Рис. 5. Среднегодовое распределение концентрации трития в атмосферных осадках над территорией Москвы (1) и в воде р. Москвы (2) за 1958–81 гг.

масштабе. Эта работа была начата в 1961 г. Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в содружестве с Всемирной метеорологической организацией (ВМО).

В 1966 г. в связи с осуществлением программы Международного гидрологического десятилетия ЮНЕСКО в сеть станций МАГАТЭ/ВМО были включены дополнительные пункты по отбору проб из рек. Однако большую часть рек не удалось покрыть наблюдательными пунктами. К 1980 г. наблюдательная сеть по измерению трития насчитывала уже более 200 станций. Программа тритиевых измерений в осадках продолжается и поныне.

Максимальные среднегодовые концентрации трития в это время в районе Москвы достигли 3900 ТЕ (рис. 5). После прекращения термоядерных испытаний запас стратосферного трития постепенно убывал с периодом полувыведения 1,2 года примерно до 1967–68 гг., затем падение концентрации замедлилось. В течение 1969–74 гг. период полувыведения составил уже 3 года. Эта величина получена нами для большой территории, и поэтому описание распределения трития с помощью уравнений кинетики первого порядка здесь не применимо.

Глобальное распределение трития в атмосферных осадках кроме общих закономерностей, которым оно подчиняется, отмечается и

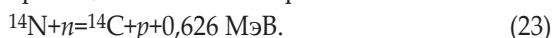
рядом региональных особенностей. Анализ этих особенностей дан в работах [Thatcher, Payne, 1965; Романов, 1978, Ферронский, Поляков, 2009].

Систематические исследования по изучению распределения трития в атмосферных осадках над территорией СССР были начаты со второй половины 1969 г. Госкомгидрометом СССР и Институтом водных проблем АН СССР. В то время в европейской части страны отбор проб производился на 18 и в азиатской части на 19 станциях. Результаты измерения содержания трития в осадках были опубликованы в сводных сборниках данных, получаемых на международной сети станций. Многолетнее распределение концентрации трития в атмосферных осадках над территорией бывшего СССР имеет картину, сходную с картиной для Центральной Европы. Общее уменьшение среднегодовых концентраций над территорией СССР к концу 1980-х гг., не учитывая временных максимумов 1975 и 1978 гг., описывается уравнением $C = 2,26 \exp(-0,096t)$, где C – отношение концентрации трития для данного года к концентрации для 1979 г. Коэффициент корреляции этого уравнения равен 0,96.

Исследованы также условия распределения трития в океане, поверхностных водах суши, подземных водах и методы использования этого природного индикатора для решения практических задач гидрологии и гидроэкологии.

Углерод играет одну из важнейших ролей в геохимических процессах формирования верхней оболочки Земли и в первую очередь при формировании осадочной оболочки планеты и эволюции биосферы. Радиоактивный изотоп углерода ^{14}C широко используется в качестве природной метки при изучении круговорота углерода на земном шаре, при перераспределении его между природными резервуарами, а также при исследовании динамики водных масс в различных звеньях гидросферы. Большое значение в современной геологии приобретает возможность определения по радиоуглероду возраста различных геологических формаций, в том числе подземных вод, в пределах временной шкалы от 0 до 60 000 лет

Как уже отмечалось, радиоуглерод образуется в атмосфере при взаимодействии вторичных нейтронов, генерируемых космическими лучами, главным образом, с азотом-14 по реакции



Эта экзотермическая реакция имеет сечение $1,81 \pm 0,5$ барн. В табл. 5 приведены также и другие реакции, ведущие к образованию радиоуглерода, однако их вклад в общий баланс ^{14}C ничтожен по сравнению с реакцией (23).

Таблица 5

Реакции образования радиоуглерода в атмосфере под действием вторичных нейтронов

Реакции	Энергия образования, МэВ	Относительная распространённость изотопа	Относительная скорость образования в атмосфере
$^{13}\text{C} (n, \gamma) ^{14}\text{C}$	+8,17	$0,23 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
$^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$	+0,626	1,0	1,0
$^{15}\text{N} (n, d) ^{14}\text{C}$	-7,98	$0,37 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$
$^{16}\text{O} (n, ^3\text{He}) ^{14}\text{C}$	-14,6	0,269	$2,7 \cdot 10^{-3}$
$^{17}\text{O} (n, \gamma) ^{14}\text{C}$	+1,02	$0,99 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
$^{20}\text{Ne}, ^{21}\text{Ne}$ (расщепление) ^{14}C -		$0,12 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$

Образовавшийся в верхних слоях атмосферы радиоуглерод в течение нескольких часов окисляется до $^{14}\text{CO}_2$ и участвует в общем глобальном круговороте углекислого газа. Общее равновесное количество радиоактивного углерода на Земле можно подсчитать теоретически. По расчётам Либби [Libby, 1965], оно составляет 81 т, а по данным Лала и других исследователей – 60–65 т, что эквивалентно суммарной активности, равной примерно $3\text{Ч}10^8$ Ки. Несмотря на то, что плотности потока вторичных нейтронов от экватора к полюсам возрастают до 3,5 раза, ^{14}C распределяется на Земле достаточно равномерно, что указывает на быстрое перемешивание атмосферы.

Некоторое количество ^{14}C может поступать на Землю с метеоритным веществом, где он образуется в результате взаимодействия космических лучей с минералами метеоритов. Исследование лунного грунта показало, что содержание углерода в образце №14163 составило 109 ± 12 г/т (109 ± 12 ppm с учётом поправки на земное загрязнение [Fireman & Stoener, 1982]). Активность радиоуглерода, выделенного из двух фракций грунта путём прокаливании в токе кислорода при $T=1000^\circ\text{C}$, составляет $31,2 \pm 2,0$ расп.·мин⁻¹/кг для фракции более 53 мкм и $11,2 \pm 2,0$ расп.·мин⁻¹/кг для фракции не менее 53 мкм.

Для изучения динамики обмена углеродом между различными природными резервуарами с использованием ^{14}C , а также при теоретических исследованиях перераспределения радиоуглерода между природными резервуарами число таких резервуаров (боксов) выбирают произвольно от одного [Gray, Damon, 1970] до шести [Keeling, 1973]. Большинство же исследований выполнено на двух- и трёхблочных моделях [Keeling, 1972].

Естественные вариации ^{14}C можно подразделить на короткопериодические, обусловленные модуляцией галактических космических лучей Солнцем, и долгопериодические, связанные с изменением геомагнитного поля Земли и климата [Дергачев, Кочаров, 1977; Sternberg, Damon, 1979]. Долговременные изменения уровня ^{14}C могут быть обусловлены также корпускулярным излучением от вспышек сверхновых. В последнее время большое внимание уделяется вековому (80–90-летнему) циклу солнечных пятен. Установить период векового цикла достаточно сложно ввиду малой продолжительности надёжных наблюдений за числом пятен (~230 лет). Тем не менее удалось методом исключения 11-летних и более длительных циклов продолжительностью до 44 лет оценить период векового цикла, который составляет примерно 80 лет. Расчёты показывают, что для 11-летнего цикла солнечной активности амплитуда изменения удельной активности ^{14}C составляет около 5%, а для векового цикла – примерно 1%. Регистрация 11-летнего изменения содержания радиоуглерода в годичных кольцах деревьев – весьма сложная задача, требующая очень точной аппаратуры. Общая активность ^{14}C падает с 1840 по 1890 г. в среднем на 0,03% в год.

Радиоуглерод поступает в океаны в результате процессов обмена углерода между растворёнными карбонатными компонентами морской воды и атмосферной двуокисью углерода. В океане радиоуглерод сравнительно быстро распределяется в перемешиваемом слое ($h \approx 100$ м, $r \approx 10$ –15 годам). Оттуда за счёт вихревой диффузии и седиментации пелагических карбонатных осадков биогенного происхождения он поступает в глубокие слои воды, в которых среднее время его пребывания (τ), по оценкам различных авторов, составляет 1500–2000 лет. Как отметил Крейг [Craig, 1957], обмен CO_2 между атмосферой и океаном должен сопровождаться изотопными эффектами. Средний изотопный состав стабильного углерода рас-

творённых гидрокарбонатов морской воды имеет значение $\delta^{13}\text{C} = -7\%$ (все данные здесь и далее приводятся относительно стандарта PDB). В результате обменных процессов происходит утяжеление углерода гидрокарбонатов до $\sim 7\%$. Обогащение океанических вод изотопом ^{13}C можно выразить через коэффициент разделения $\alpha_{^{13}\text{C}} = R_0/R_a$, где R_0 и R_a – отношение изотопов углерода $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в океане и атмосфере. Значения R представим в виде $(1 + \delta^{13}\text{C}/1000)$. Тогда формула для коэффициента α переписывается в виде:

$$\alpha_{^{13}\text{C}} = \frac{1 + \delta^{13}\text{C}_0/1000}{1 + \delta^{13}\text{C}_a/1000}$$

По аналогии для углерода-14 имеем

$$\alpha_{^{14}\text{C}} = \frac{1 + \delta^{14}\text{C}_0/1000}{1 + \delta^{14}\text{C}_a/1000} = \frac{(^{14}\text{C}/^{13}\text{C})_0}{(^{14}\text{C}/^{13}\text{C})_a}$$

Константа разделения увеличивается в квадратичной зависимости с добавлением каждого нейтрона к изотопическому ядру. Тогда $\alpha_{^{14}\text{C}} = \alpha_{^{13}\text{C}}^2$. Принимая $(1+x)^2 = 1+2x$ при $x \ll 1$, получим

$$\alpha_{^{14}\text{C}} = \frac{1 + \delta^{14}\text{C}_0/1000}{1 + \delta^{14}\text{C}_a/1000} = \frac{1 + 2\delta^{13}\text{C}_0/1000}{1 + 2\delta^{13}\text{C}_a/1000} \quad (24)$$

Пользуясь последним соотношением, можно показать, что если бикарбонаты океанической воды обогащены ^{13}C на 7% , то для ^{14}C это обогащение должно составить примерно 14% . Иными словами, $\epsilon_{^{14}\text{C}} = 2\epsilon_{^{13}\text{C}}$, где $\epsilon_{^{13}\text{C}} = \delta^{13}\text{C}_0 - \delta^{13}\text{C}_a$.

Таким образом, теоретическое рассмотрение вопроса обмена CO_2 между атмосферой и океаном показывает, что углерод поверхностных вод океана должен быть обогащён изотопом ^{14}C примерно на 14% по сравнению с углеродом атмосферы. Аналогично можно показать, что биосфера по сравнению с атмосферой должна иметь дефицит ^{14}C , равный примерно 3% ($\delta^{13}\text{C}_a = -25\%$). Для унификации всех радиоуглеродных измерений, как указывалось выше, производят нормализацию содержания ^{14}C (в исследуемых образцах на -25%). Было показано, в частности, что гидрокарбонаты перемешиваемого слоя Атлантического, Индийского и Тихого океанов севернее 40° ю.ш. имеют практически постоянное содержание ^{14}C , близкое (без изотопной коррекции) к его содержанию в биосфере [Suess, 1967].

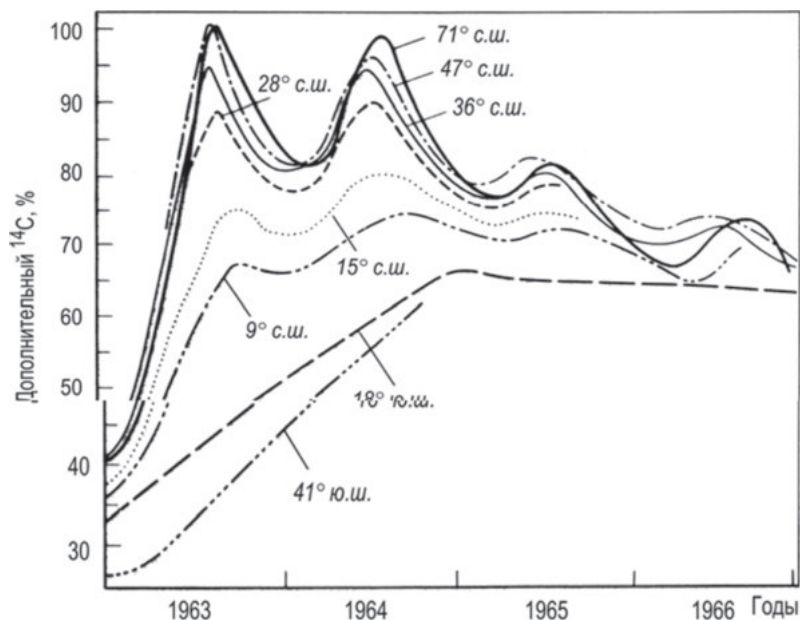


Рис. 6. Изменение концентрации ^{14}C в тропосферном CO_2 во времени [Fairhall, Young, 1970]

В настоящее время накоплен большой фактический материал по датированию раковин моллюсков, обитавших в водах нормальной морской солёности. Исследование образцов, отобранных с середины 19 в. до 1950 г. в прибрежных частях различных океанов, даёт основание сделать вывод о том, что содержание радиоуглерода в перемешиваемом слое океанской воды (без изотопной коррекции) в дотермоядерную эпоху было также несколько ниже биогенного уровня, определяемого как 0,95 активности щавелевой кислоты NBS. Поданным Джилеспии Полака [Gillespie, Polach, 1979], изучавших распределение радиоуглерода в раковинах моллюсков из прибрежных вод различных океанов за период 1840–1950 гг., можно сделать вывод, что содержание радиоуглерода в перемешиваемом слое могло варьировать в естественных условиях в пределах от +8 до -11% от современного стандарта. В среднем углерод обеднен ^{14}C (без коррекции) примерно на 15.

Поданным различных авторов [Fairhall, Young, 1970], во время ядерных испытаний в атмосферу Земли было выброшено до $6 \cdot 10^{28}$ атомов ^{14}C .

Поскольку до ядерных испытаний содержание ^{14}C в атмосфере оценивалось величиной $4,1 \cdot 10^{28}$ атомов, то, следовательно, вместе с бомбовым ^{14}C содержание его возросло в 2,5 раза. По отношению к общему равновесному содержанию на Земле бомбовый ^{14}C составляет 2,5%.

Были предприняты многочисленные экспериментальные исследования (до тысячи образцов) по измерению содержания ^{14}C в тропосфере и стратосфере как в широтном, так и меридиональном направлениях [Fairhall, Young, 1970; Munnich, Vogel, 1963; Fairhalletal., 1969; Hagemann et al., 1959]. На рис. 6 представлены наиболее характерные результаты этих исследований, обобщённые, по данным различных авторов, для тропосферного CO_2 с 1963 по 1966 г.

На рисунке видны чёткие сезонные вариации концентрации ^{14}C в Северном полушарии и значительный широтный градиент изменения концентрации в 1963 г. Однако этот градиент быстро падал и к 1967 г. снизился почти до нуля. Оба эти эффекта являются следствием сезонных вариаций поступления бомбового ^{14}C из стратосферы в тропосферу и меридионального смещения тропосферы. Наиболее интенсивные поступления ^{14}C в тропосферу, как и для трития, отмечаются весной и ранним летом. В это время происходит наиболее эффективное его смешивание в меридиональном направлении.

Уменьшение содержания бомбового ^{14}C в атмосфере происходит за счёт поглощения его земной биосферой и обмена CO_2 атмосферы и поверхности океанов. Последний источник наиболее важный, поскольку более 80% атмосферного CO_2 ежегодно обменивается с океаническими водами и около 20% обращается через континентальную биосферу. Учитывая роль океана в поглощении бомбового ^{14}C , были предприняты исследования по измерению содержания ^{14}C в океанических поверхностных и глубинных водах [Bien, Suess, 1967; Nydal, 1967; Fairhalletal., 1969]. В отличие от атмосферы, где смещение ^{14}C происходит относительно быстро (менее чем за десять лет), процесс смешения в океане более длительный и сложный. Радиоуглеродный метод оказался весьма эффективным для изучения таких океанографических процессов, как смешение океанических вод и их глубинная циркуляция.

На основе исследования закономерностей распределения радиоуглерода в природных водах разработан метод их радиоуглеродного датирования, который широко используется в практике.

Кроме трития и радиоуглерода, в исследованиях природных вод гидросферы находят применение и другие космогенные изотопы. В результате реакций расщепления ядер неона образуются изотопы ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^3\text{H}$ и др. Но выход изотопов при этих реакциях ниже, чем при реакциях расщепления аргона. Кроме того, в атмосфере отношение концентраций $\text{Ne}/\text{Ar}=0,02$. Содержание криптона и ксенона в атмосфере ещё ниже, и вкладом космогенных изотопов от реакций на этих элементах можно пренебречь. При этом лишь реакции (n, γ) на ядрах ${}^{80}\text{Kr}$, ${}^{84}\text{Kr}$ и ${}^{132}\text{Xe}$ могут служить источником очень небольших количеств ${}^{81}\text{Kr}$ ($T_{1/2}=2,1 \cdot 10^5$ лет), ${}^{85}\text{Kr}$ ($T_{1/2}=10,8$ лет) и ${}^{133}\text{Xe}$ ($T_{1/2}=5,3$ сут). Ориентировочная оценка выхода космогенного ${}^{81}\text{Kr}$ в реакции (n, γ) дает значение, равное $3 \cdot 10^{-7}$ ат./см².с.

Исследования содержания натрия в верхней атмосфере показывают, что на высоте около 80 км присутствует лишь атмосферный натрий в количестве примерно 10^{10} ат./см². Сечение реакции ${}^{23}\text{Na}$ ($n, 2n$) ${}^{22}\text{Na}$ составляет примерно 10 мбарн. В этом случае скорость образования ${}^{22}\text{Na}$ составит около 10^{-5} – 10^{-6} ат./см².с. Хотя в нижних слоях атмосферы плотность ${}^{23}\text{Na}$ на несколько порядков выше, но за счёт уменьшения интенсивности потока космических лучей скорость генерации ${}^{22}\text{Na}$ здесь оказывается того же порядка, что и в верхних слоях атмосферы.

Были проведены систематические измерения (1960–73 гг.) концентраций ${}^{22}\text{Na}$ и ${}^7\text{Be}$ в атмосферном воздухе и в выпадениях в Прибалтике, в районах Вильнюса [Луянас и др., 1975] и Ленинграда [Гритченко и др., 1975]. На этой основе был выявлен ряд общих закономерностей изменения концентраций исследуемых изотопов во времени, которые являются общими для всех космогенных изотопов. В том числе установлен сезонный характер изменения концентраций ${}^{22}\text{Na}$ и ${}^7\text{Be}$ с весенне-летним максимумом и осенне-зимним минимумом. Максимальные многолетние концентрации, связанные с термоядерными испытаниями, зарегистрированы в 1963 г.

Было найдено, что в 1962–63 гг. в результате термоядерных испытаний в стратосфере образовались значительные запасы ${}^{22}\text{Na}$, и его выпадения в 1962–66 гг. во много раз превышали выпадения ${}^{22}\text{Na}$ космогенного происхождения. Из приведённых данных можно оценить период полувыведения ${}^{22}\text{Na}$ из стратосферы, который в данном случае составляет 9,6 мес. и около 12 мес.

В описываемых опытах максимум концентрации ^7Be , равный 79 ат./г воздуха, был получен в конце мая 1965 г., а минимум, равный около 2,7 ат./г воздуха, – в январе 1971 г.

Ряд приведённых выше космогенных изотопов нашёл применение для датирования природных вод. Значительные успехи достигнуты в исследовании долгоживущих космогенных изотопов, таких как ^{10}Be (период полураспада $1,6 \cdot 10^6$ лет), ^{26}Al ($7,16 \cdot 10^5$ лет), ^{36}Cl ($3,01 \cdot 10^5$ лет) ^{129}I ($1,57 \cdot 10^7$ лет). Эти изотопы уже находят применение в исследовании условий и скорости накопления донных осадков в водохранилищах, озёрах и океане, а также для датирования древних подземных вод [Fröhlich et al., 1977; Lehrman, 1993; Bentley et al., 1986; Кочаров, 1975; Lal et al., 1970; Möller, Wagner, 1967; Alder et al., 1967].

Образование и распределение радиогенных изотопов

В настоящее время в земной коре известно более двадцати долгоживущих радиоактивных изотопов тяжёлых элементов с очень большим периодом полураспада, которые были свидетелями тех гигантских по масштабам процессов, которые привели к образованию химических элементов в нашей Галактике. В табл. 6 приведены основные характеристики этих изотопов. Вследствие значительных трудностей, связанных с выделением и измерением ультрамалых количеств радиоактивных изотопов, при датировании геологических объектов наиболее интенсивно используются ^{40}K , ^{87}Rb и изотопы уран-ториевых рядов. Наибольший интерес среди них представляют элементы уран-ториевых рядов (номера 81–92 в периодической системе элементов).

Испытывая многочисленные последовательные превращения, эти элементы образуют три ряда радиоактивных изотопов. Существование в природе этих трёх рядов определяется наличием родоначального элемента, с периодом полураспада сравнимым с возрастом Земли. В уран-радиевом ряду таковым является изотоп урана с массовым числом 238 и периодом полураспада $4,51 \cdot 10^{10}$ лет. Уран-235 с периодом полураспада $7,13 \cdot 10^8$ лет служит родоначальником собственного ряда, известного в ранних работах как ряд актиноурана. Торий-232 с периодом полураспада $1,39 \cdot 10^{10}$ лет – родоначальный элемент в ториевом ряду. Конечными продуктами в каждом ряду пре-

Таблица 6

Долгоживущие радиоактивные изотопы [Войткевич, 1961]

Материнский элемент	Дочерний элемент или конечный изотоп радиоактивного семейства	Период полу распада	Тип распад	Относительная распространённость, %
^{40}K	^{40}Ar	$1,3 \cdot 10^9$	β (88%)	0,0118
	^{40}Ca	$1,3 \cdot 10^9$	К-захват (12%)	0,0118
^{50}V	^{50}Ti	$6,0 \cdot 10^{15}$	К-захват	0,24
	^{50}Cr	$6,0 \cdot 10^{15}$	β	0,24
^{87}Rb	^{87}Sr	$4,7 \cdot 10^{10}$	β	27,85
^{115}In	^{115}Sn	$5,9 \cdot 10^{14}$	β	95,67
^{123}Te	^{123}Sb	$1,2 \cdot 10^{13}$	К-захват	0,87
^{138}La	^{138}Ba	$1,1 \cdot 10^{11}$	К-захват (70%)	0,089
	^{138}Ce	$1,1 \cdot 10^{11}$	β (30%)	0,089
^{142}Ce	^{138}Ba	$5,0 \cdot 10^{15}$	α	11,7
^{144}Nd	^{140}Ce	$2,4 \cdot 10^{15}$	α	23,8
^{147}Sm	^{143}Nd	$1,0 \cdot 10^{11}$	α	15,1
^{148}Sm	^{144}Nd	$1,2 \cdot 10^{13}$	α	11,35
^{149}Sm	^{145}Nd	$4,0 \cdot 10^{14}$	α	14,0
^{152}Gd	^{148}Sm	$1,1 \cdot 10^{14}$	α	0,205
^{156}Dy	^{152}Gd	$2,0 \cdot 10^{14}$	α	0,057
^{174}Hf	^{170}Yb	$4,3 \cdot 10^{15}$	α	0,163
^{176}Lu	^{176}Hf	$2,2 \cdot 10^{10}$	β	2,588
^{187}Re	^{187}Os	$4,0 \cdot 10^{10}$	β	62,93
^{190}Pt	^{186}Os	$7,0 \cdot 10^{11}$	α	0,0127
^{207}Pb	^{200}Hg	$1,4 \cdot 10^{17}$	α	1,4
^{232}Th	^{208}Pb	$1,39 \cdot 10^{10}$	$6\alpha+4\beta$	100
^{235}U	^{207}Pb	$7,1 \cdot 10^8$	$7\alpha+4\beta$	0,715
^{238}U	^{206}Pb	$4,51 \cdot 10^{10}$	$8\alpha+6\beta$	99,28

вращений являются стабильные изотопы свинца, соответственно ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb . Если бы в природных процессах не происходило разделение элементов и изотопов, то ряды находились бы в состоянии радиоактивного равновесия, и содержание каждого элемента строго определялось бы содержанием родоначальника соответствующего ряда в соответствии с уравнением радиоактивного равновесия.

Содержание урана и тория – родоначальников радиоактивных рядов – в природных водах определяется их содержанием и распределением в горных породах. В табл.8 приведены их содержания в

основных типах пород и в каменных метеоритах, по В.В. Чердынцеву [1969].

Таблица 7

Содержание урана и тория в породах и каменных метеоритах

Порода	Содержание, 10^{-6} , г/г		
	U	Th	Th/U
Базальты	0,59	2,7	4,6
Габбро	0,96	3,9	4,0
Изверженные породы земной коры (средние значения)	1,5	5,4	3,6
Гранодиориты	2,0	7,8	3,9
Граниты	3,0	13	4,3
Осадочные породы	3,0	13,3	4,4
Почвы	2,9	9,0	3,2
Каменные метеориты (хондриты)	0,006–0,03	0,03–0,08	4,0

Из всех радиоэлементов уран-ториевых рядов наиболее полные сведения по содержанию в природных водах имеются для урана и радия; значительно меньше – для тория-232, урана-234, радона; незначительные – для изотопов тория, ^{230}Th и ^{228}Th . Имеются единичные данные по содержанию протактиния, мезотория, полония, радиоактивного свинца-210. Всё это определяется значительными методическими трудностями по выделению и определению малых количеств изотопов тяжёлых радиоэлементов. При определении изотопного состава приходится концентрировать радиоэлементы из больших объёмов воды (порядка сотен литров), как правило, в полевых условиях. Лишь для определения содержания урана достаточно 1 л воды. Этим главным образом и объясняется обилие данных по содержанию урана-238 в гидросфере.

Среднее содержание урана в атмосферных осадках, по А.И. Германову [Виноградов, 1963] составляет $2-3 \cdot 10^{-8}$ г/л. Основные поставщики урана в атмосферные осадки – частицы пыли. Поэтому содержание урана в осадках существенно зависит от региональных климатических условий. Дождевые воды аридных областей, где в атмосферу поступает масса пыли, содержат больше урана ($n \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-6}$ г/л). В атмосферных выпадениях г. Вильнюса [Стыро и др., 1970] концентрация урана достигала $73,3 \cdot 10^{-6}$ г/г. Корреляция высоких содержаний урана с присутствием ^{239}Pu (типично техногенного изотопа в атмос-

ферных выпадениях) указывает на техногенную природу урана. Высокие концентрации урана наблюдаются в зимние месяцы. Выпадения урана-238 летом носят локальный характер и обусловлены выдуванием пыли из почв близлежащих районов. Концентрации урана в выпадениях в этот период уменьшаются.

В реках (по Германову) содержание растворённого урана изменяется от $3 \cdot 10^{-8}$ до $n \cdot 10^{-5}$ г/л при среднем значении около $1 \cdot 10^{-6}$ г/л. Большое влияние на содержание урана оказывают климатические условия. Для рек аридных регионов общая минерализация и содержание урана выше по сравнению с реками гумидных регионов. Вниз по течению некоторых рек (Днепра, Дона, Волги, Сырдарьи, Амударьи) содержание урана увеличивается.

В районах месторождений урана его содержание в водах малых рек и ручьёв повышается до $n \cdot 10^{-4}$ г/л. Вопрос о миграции урана в речной воде подробно рассмотрен в работах Г.Н. Батурина и А.Л. Коченова [1968; 1969]. Они проводили комплексные исследования по определению содержания урана в растворённой и взвешенной формах. По данным Батурина, содержание урана в дельтовых илах 12 рек бывшего СССР изменяется в пределах $(0,4-3) \cdot 10^{-6}$ г/г. Максимальные величины характерны для взвесей Сырдарьи, Дона и Волги, минимальные – для взвесей Северной Двины и Амударьи. Средневзвешенное значение, определённое с учётом годового твёрдого стока, составляет $1,05 \cdot 10^6$ г/г, что более чем в два раза ниже ($2,6 \cdot 10^{-6}$ г/г) среднего содержания урана в земной коре. Для рек бассейнов Чёрного и Каспийского морей Батурин установил две общие закономерности: 1) прямую зависимость относительного содержания взвешенного урана от модуля твёрдого стока (среднегодового количества наносов, поступающих с единицы площади водосбора) и значительно менее чёткую, но также прямую зависимость от доли механической денудации; 2) обратную зависимость среднего содержания урана в воде от модуля водного стока (среднегодового количества воды, поступающей с единицы площади водосбора).

В океанической воде среднее содержание урана близко к $3 \cdot 10^{-6}$ г/л [Виноградов, 1967]. И.Е. Старик и Л.Б. Колядин [1957] на основании экспериментальных данных показали, что в океанических водах уран находится в ионно-дисперсном состоянии в виде прочного уранил-карбонатного комплекса $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$. Лишь при $\text{pH} > 7,5$ и

$Eh < 0,1$, не типичных для океанических вод, возможно существование урана в форме продуктов гидролиза, способных адсорбироваться на коллоидных и более крупных взвешенных частицах и осадаться на дно. В водах морей, которые питаются реками из гумидных зон, содержание урана несколько ниже (для Балтийского моря $0,8-2,2 \cdot 10^{-6}$ г/л [Батурин, 1968]), в водах замкнутых бассейнов аридных зон содержание урана повышается (для Аральского моря $30-50 \cdot 10^{-6}$ г/л, для Каспийского моря $10 \cdot 10^{-6}$ г/л [Коченов, Батурин, 1967]). В пределах бассейна по площади и глубине уран распределяется достаточно равномерно. Лишь в придонных слоях Чёрного моря содержание урана заметно падает до $n \cdot 10^{-7}$ г/л [Батурин и др., 1966]. Это падение авторы связывают с процессами его адсорбционного извлечения из воды непосредственно у контакта с осадками при наличии резко восстановительной среды. Причем одним из важнейших факторов является органическое вещество, которое, по их мнению, может захватывать уран в процессе осаждения из водной толщи, заражённой сероводородом. Концентрация урана во взвесах Индийского океана изменяется от 0,1 до $2 \cdot 10^{-6}$ г/г [Кузнецов и др., 1967]. Однако основное количество урана, т.е. более 99,9%, в океанической воде находится в растворённой форме.

В наиболее широких пределах содержание урана варьирует в подземных водах. Это объясняется разными формами вхождения урана в горные породы, различием гидродинамического режима и различной гидрохимической обстановкой, обуславливающей переход радиоактивных элементов в воду. Обычно большинство исследователей в пределах каждого артезианского бассейна выделяют три гидродинамические зоны: интенсивного, затруднённого и весьма затруднённого водообмена. В зоне интенсивного водообмена распространены воды с растворённым кислородом, обладающие высоким окислительно-восстановительным потенциалом. В этой зоне происходит окисление четырёхвалентного урана в шестивалентный и переход его в раствор. В зонах затруднённого и весьма затруднённого водообмена, характеризующихся восстановительными условиями, воды лишены кислорода, но обгащены сероводородом и органическим веществом. Воды этих зон содержат уран в очень малых количествах.

Исследование задач динамики влаги и палеогидрологии

Прямые измерения скорости переноса влаги в атмосфере на основе исследований содержания трития в атмосферном водяном паре были проведены в Институте водных проблем АН СССР [Ферронский и др., 1980]. В основу этих измерений была положена идея обнаружения тритиевой метки в водяном паре, образовавшейся в результате взрыва ядерного устройства, произведённого КНР в 1978 г. Регулярный отбор проб водяного пара для анализа содержания трития был начат в ноябре 1977 г. в Москве. Пробы отбирались в приземном слое воздуха на высоте 5 м над землёй регулярно, один раз в месяц. После сообщения о ядерном взрыве в КНР, который был произведён 14 марта 1978 г., отбор проб участился. Пробы отбирались 16, 17, 21, 22 и 23 марта, 4, 13, 18 и 26 апреля, а также последующие месяцы вплоть до июля 1978 г.

В течение двух недель после взрыва прохождение радиоактивно-го облака было зафиксировано в Японии, Канаде, Англии, Норвегии по превышению уровня радиоактивности в атмосферном воздухе и в атмосферных осадках [Cambraу et al, 1978]. Следует отметить, что большая часть таких радиоактивных изотопов, как ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{95}Nb , ^{140}Ba и др. (за исключением ^{14}C , T и некоторых изотопов инертных газов), образующихся при ядерных взрывах в атмосфере, сорбируются аэрозолями, в силу чего для определения содержания радиоактивных изотопов в атмосфере чаще всего изучают аэрозоли. Степень различия движения водяного пара и аэрозолей может отличаться от движения воздуха в нижних слоях тропосферы из-за удаления аэрозолей осадками и их оседания на подстилающую поверхность [Стыро, 1968]. Кроме того, из динамики флюидов известно, что скорости флюида-носителя и инородных частиц связаны соотношением $V_{\text{ч}} = V_{\text{н}}(1+h)$, где $V_{\text{ч}}$ – скорость инородной частицы; $V_{\text{н}}$ – скорость флюида-носителя; $h=f(m_{\text{ч}})$ коэффициент распределения, зависящий от массы $m_{\text{ч}}$ движущихся частиц. Если воздушный поток переносит частицы, имеющие различные массы, то коэффициент h будет тем больше, чем больше масса частицы, а значит, тем меньше её скорость.

23 марта в Москве было зафиксировано первое повышение концентрации трития в атмосферном водяном паре до 400 ТЕ, что в

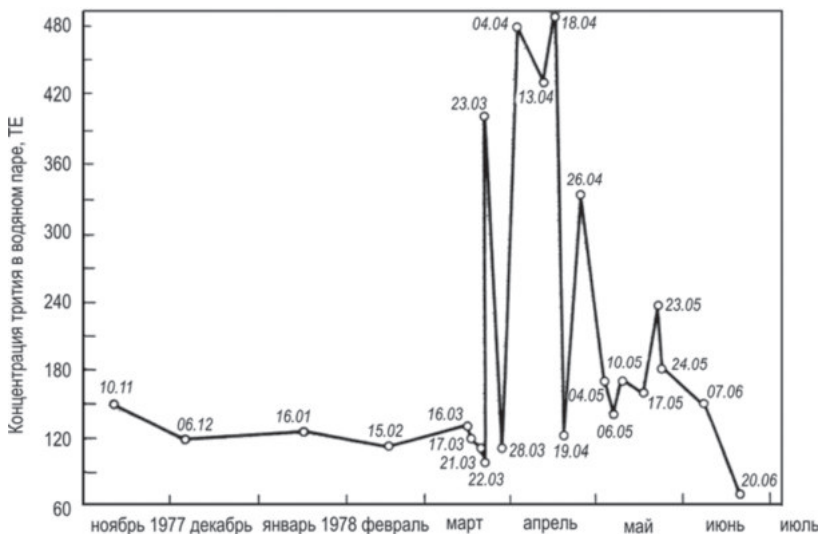


Рис. 7. Изменение концентрации трития в атмосферном водяном паре с ноября 1977 г. по июнь 1978 г. Цифрами у экспериментальных точек указаны даты отбора проб

четыре раза превысило его концентрации, отмеченные ранее с ноября 1977 г. (рис. 7). В пробе, отобранной 28 марта, концентрация трития равнялась нормальному для этого периода года уровню (120 ТЕ); 4 апреля она вновь имела пиковое значение (480 ТЕ). Близкая к этому значению концентрация трития наблюдалась в пробах, отобранных 13 и 18 апреля; 26 апреля содержание трития в водяном паре было вдвое меньше последней, а в дальнейшем снизилось до нормального фона.

Авторы произвели оценку концентрации трития в атмосферном водяном паре радиоактивного облака от ядерного взрыва 14 марта 1978 г., для чего приняли минимальное значение выхода трития при взрыве $-0,07 \text{ кг/Мт}$ [Miske, 1973]. Тогда для взрыва не большой мощности (до 10 кт) выход трития составит 0,7 г, или около 7000 Ки. Большая часть трития после взрыва образует молекулы НТО и в начальный момент сосредотачивается в ограниченном объёме атмосферы, который можно представить в виде цилиндра с площадью основания $S = \pi D^2/4$, где D – диаметр облака, м, который, согласно [Glasston, 1962], равен $360 W^{5/2}$ (W – энергия взрыва, кт). Для $W=10$ кт и $D \approx 1000$ м $S=1$ км.

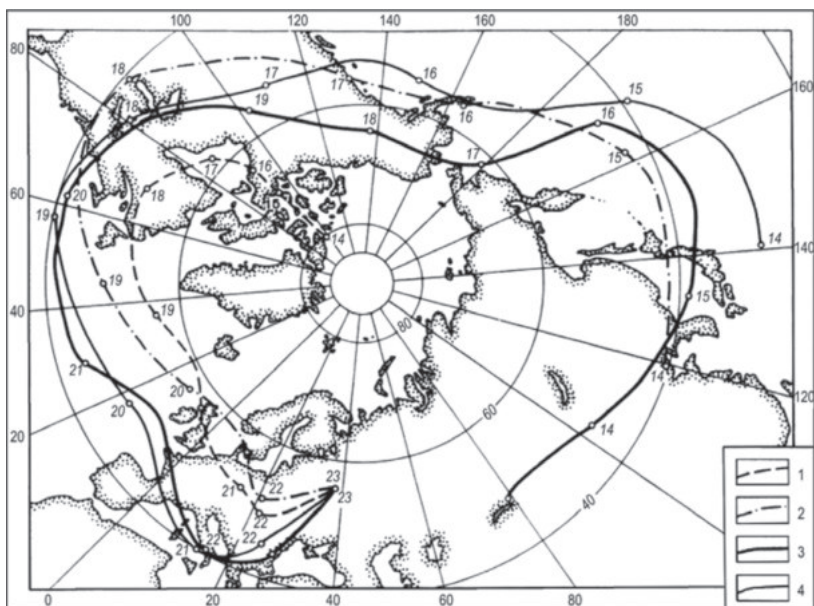


Рис. 8. Расчётные траектории и даты движения воздушных масс на высотах 1–3 (700); 2–5 (500); 3–9 (300); 4–12 (200) км; (в скобках указано атмосферное давление, мб). Траектории 2 и 3 привязаны к 12 ч, 1 и 4 – к 00 ч по Гринвичу

Повышенная концентрация трития, зарегистрированная в Москве 23 марта 1978 г., связана с прохождением над городом воздушной массы, которая находилась над КНР и прошла над Японией, Тихим океаном, Канадой, США, Атлантическим океаном, Средиземным морем и юго-востоком Европы (рис. 8). Перемещение воздушной массы с повышенной концентрацией трития в водяном паре прослежено на высоте изобарической поверхности 300 мб (9 км). На более низких высотах (5 и 3 км) перемещение воздушных масс происходило медленнее за счёт большей неоднородности барического поля и меньшей скорости их движения чем на высоте 9 км. Так, если на высоте 9 км за 12 и 23 марта рассматриваемая воздушная масса прошла путь от Бухареста до Москвы, то на высоте 5 км воздушные частицы прошли путь в два раза меньший.

Анализ барического поля показал, что 23 марта на высотах 5 и 3 км Москвы достигли воздушные частицы, пришедшие из районов Северного полушария, совсем другие, чем воздушные частицы, перемещавшиеся на высоте 9 км. По расчётам авторов данной рабо-

ты, воздушные частицы, пришедшие в Москву 23 марта на высоте 12 км (АТ – 200 мб), ещё 14–15 марта находились над Тихим океаном, к востоку от Японии, т.е. восточнее района взрыва.

Карты барической топографии показали, что с 14 марта и до конца апреля в умеренных широтах Тихого океана наблюдалась очень устойчивая зональная циркуляция воздушных масс, препятствовавшая широтному рассеянию радиоактивного облака, которое перемещалось в мощном западном потоке воздушной массы, пришедшей в Москву 23 марта.

Таким образом, повышение концентрации трития в атмосферном водяном паре, зарегистрированное в Москве 23 марта, вызвано приходом воздушной массы, которая в день ядерного взрыва находилась над северо-западной территорией КНР. Оттуда эта масса перемещалась в восточном направлении в слое между 5 и 9 км по соответствующим траекториям. Проба атмосферного водяного пара, взятая 28 марта 1978 г., характеризовалась нормальной концентрацией трития (120 ТЕ). Воздушная масса, из которой отбиралась проба в этот день, в момент взрыва находилась в районе Индокитайского полуострова и перемещалась по более южной траектории, чем воздушная масса, вышедшая с территории КНР 14 марта 1978 г. Условия общей циркуляции атмосферы (циклон над Якутией и антициклон в южных широтах) не способствовали её перемешиванию с более северными воздушными массами. Примерно половина её пути проходила над Тихим океаном в широтном поясе 20° и 30° с.ш., а затем над территорией США. Путь этой массы над Атлантическим океаном и Европой мало отличался от пути движения воздушной массы, пришедшей в Москву 23 марта, но происходил с отставанием. Пиковые концентрации трития 13, 18 и 26 апреля (см. рис.8), вероятно, также связаны с взрывом 14 апреля 1978 г., поскольку значительные превышения концентраций короткоживущих изотопов (таких, как ^{140}Ba , ^{131}I , ^{95}Zr) в атмосфере, вызванные этим же взрывом, отмечались на станциях наблюдательной сети AERE до конца апреля [Cambray et al., 1979].

Наблюдения за тритиевой меткой, образовавшейся в результате произведенного в КНР ядерного взрыва, и построение траекторий перемещения воздушных частиц позволили очертить путь, пройденный воздушной массой с повышенной радиоактивностью, и затраченное на него время. Эта масса пришла из КНР в Москву

через 9 дней после взрыва, пройдя за это время около 30 000 км. Скорость перемещения воздушных частиц на высоте 9 км составила примерно 3000 км/сут. Для обращения вокруг земного шара в широтном поясе от 40° до 65° с.ш. (в отдельных местах траектория воздушных частиц опускалась до 35° с.ш.) воздушной массе понадобилось 12 дней, при этом пройденный ею путь составил 33 000 км. Время обращения водяного пара вокруг Земли, равное 12 дням, относится к высоте, на которой обычно переносится очень мало влаги.

Для изучения процессов разбавления атмосферной влаги поверхностной морской водой В.В. Романовым и Х.Г. Кикичевым [1981] были выполнены экспедиционные работы в августе 1978 г. в время рейсе НИС «Муксун» Морского гидрографического института АН УССР. Проводился одновременный отбор проб поверхностной морской воды и атмосферного водяного пара в северо-западной части Чёрного моря. Отбор водяного пара производился методом адсорбции на синтетических цеолитах; измерение концентрации трития – жидкостно-сцинтилляционным методом с предварительным электролитическим обогащением. Интересно отметить, что полученные результаты о доле морской воды в атмосферном водяном паре совпадают с результатами работы, проведенной на оз. Иссык-Куль, где доля озёрной воды в атмосферных осадках достигала 50% [Брезгунов и др., 1980].

Одним из важных процессов водообмена в прибрежных морских акваториях является смешение морских и речных вод. Экспериментальное изучение этого процесса с использованием трития и других природных изотопов является перспективным направлением океанографических исследований. Были выполнены экспериментальные исследования в бассейнах Чёрного и Белого морей по изучению условий смешения морских и речных вод с помощью трития [Романов, 1982]. Аналогичные исследования по оценке условий смешения речных и морских вод с помощью трития и кислорода-18 были выполнены для Каспийского моря [Романов 1982; Брезгунов и др., 1982]. Совместное использование трития и стабильных изотопов позволяет выполнить более детальный анализ условий смешения речных и морских вод на экспериментальной основе.

Космогенные изотопы нашли применение при решении задач, связанных с определением времени водообмена в природных резервуарах, а также при изучении взаимосвязи между атмосферными осадками и речным стоком, при расчленении гидрографа на компоненты, при оценке параметров подземного стока в реки и водохранилища. Как правило, такие исследования сочетаются с использованием стабильных изотопов водорода и кислорода и классических методов

Работы по исследованию крупнейшего в мире пресноводного озера Байкал проводились на протяжении ряда лет [Сойфер и др., 1970; Брезгунов и др., 1980], когда впервые с этой целью были отобраны и проанализированы образцы воды на двух глубоководных станциях, расположенных в районе максимальных глубин. В 1973 г. были проведены съемки поля концентраций трития в поверхностных водах озера вдоль его западного берега и получено распределение концентрации трития по глубине в северной котловине озера (от Нижнеангарска до створа мыс Котельниковский–Иринда).

Гидрологические и гидрогеологические задачи, решаемые с использованием ^{14}C , можно разделить на две группы: задачи качественные и количественные. К первой группе следует отнести задачи, связанные с определением локальных очагов питания водоносных горизонтов, областей разгрузки подземных вод и мест взаимосвязи водоносных горизонтов. Вторая группа задач включает оценку возраста подземных вод, определение пропорций смешения вод различных водоносных горизонтов и комплексов, расчленение водопритоков в горных выработках, определение региональных направлений и скоростей фильтрации подземных потоков. Примером изучения взаимосвязи подземных вод с использованием радиоуглерода является работа по изучению Днепровско-Донецкого артезианского бассейна [Боревский и др., 1975].

Интересные палеогидрологические исследования были выполнены в Арало-Каспийском бассейне. Считается, что гидрологические, климатические и экологические изменения в Арало-Каспийском бассейне являются интегральным отражением природно-климатических изменений, происходящих на территории Европы и Центральной Азии под действием потока атмосферной влаги, переносимой циклоническими вихрями, которые формируются в

Атлантическом океане и перемещаются с запада на восток силовым полем Земли. Давно замечено, что интегральная реакция на эти природно-климатические изменения проявляется в виде колебаний уровня Каспийского моря, которые происходят в форме квазипериодических изменений с амплитудой до десятков метров и с периодом от десятков до сотен и тысяч лет. Последнее такое повышение уровня моря после его 40-летнего падения произошло с 1977 по 1995 г. с амплитудой подъёма около 2,5 м.

В августе 1994 г. в ходе российско-французской экспедиции были отобраны керны донных осадков в глубоководных частях Среднего и Южного Каспия. Оборудование для отбора керна состояло из поршневой трубки Кулленберга с внешним диаметром 114 мм. Внутри стальной трубы помещали пластиковую трубу-оболочку с внутренним диаметром 90 мм, снабжённую поршневой системой. На верхнем крае 25-метровой колонны труб монтировали балластный груз весом 1,5 т. Колонну опускали на лебедке за борт корабля и с высоты 100 м от дна моря колонна свободно падала в точке отбора керна. Затем колонну с керном поднимали на борт. Пластиковую оболочку с керном извлекали из стальной трубы, разрезали на секции по 1,5 м длиной, изолировали и маркировали. В таком виде керн отправляли для лабораторного анализа вещественного и изотопного состава осадков. Всего отобрали 28 кернов, которые были разделены между партнёрами для дублирования лабораторных анализов. Максимальная длина керна, отобранного в Среднем и Южном Каспии составляла около 10 м при глубине воды 500 м. Наряду с отбором керна донных осадков, на станциях проводили замеры солёности и температуры воды, а также отбирали пробы воды для определения её химического и изотопного состав. Всего было сделано 15 станций, в том числе 7 в Южном, 6 в Среднем, и 2 в Северном Каспии.

В 1995 и 1996 гг. на Каспийском море были проведены два круиза МАГАТЭ, во время которых на станциях меридионального профиля произведен отбор проб воды, замерялась температура и солёность по разрезу водной толщи. Пробы воды отбирали также и во время российско-французской экспедиции 1994 г. Воду анализировали на содержание дейтерий, кислорода-18 и трития. Дополнительно были отобраны специальные пробы воды для анализа в них содер-

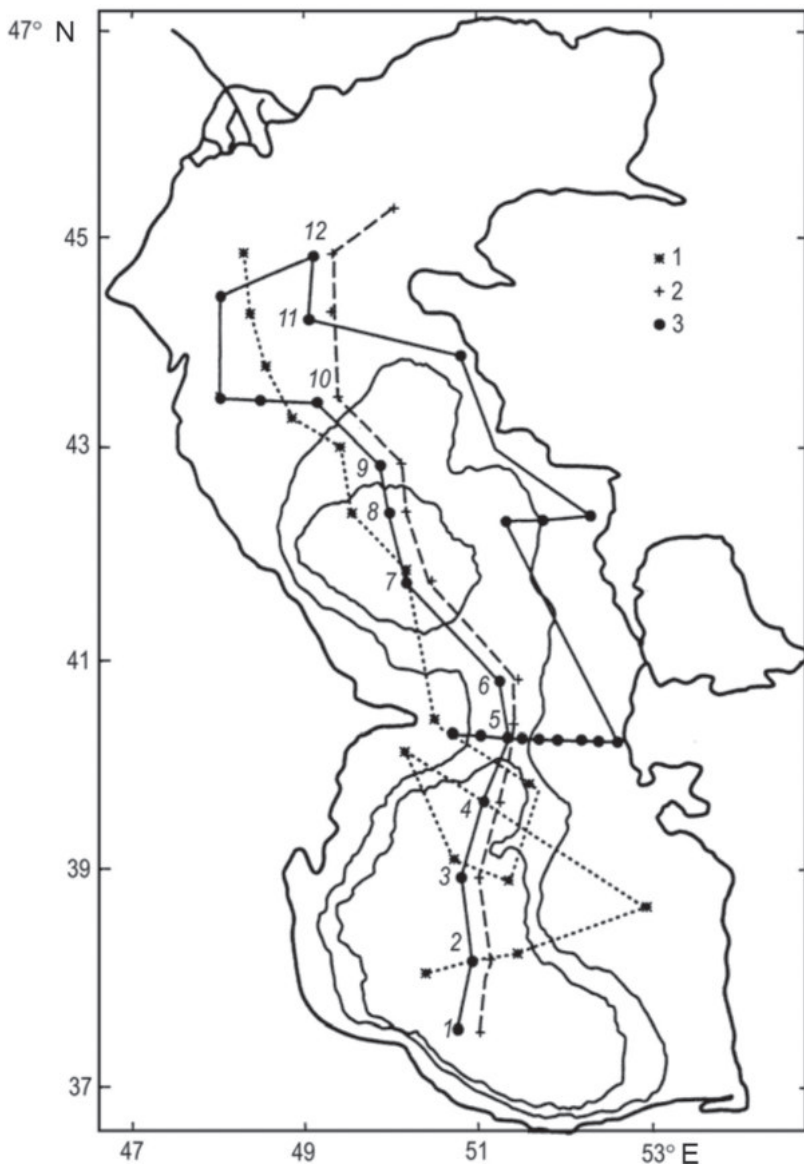


Рис. 9. Маршруты экспедиций и станции отбора керна и образцов воды в 1994 (1), 1995 (2), 1996 (3) гг.

жания изотопов гелия, трития и урана-тория. Кроме того, была выполнена работа по изучению содержания изотопов водорода и

кислорода в среднемесячных пробах атмосферных осадков и в ежемесячных однократных пробах волжской воды.

Сделанные измерения позволили получить представительную картину текущего распределения изотопных и океанографических параметров водных масс Среднего и Южного Каспия на стадии стабилизации уровня моря после почти 20-летнего периода его подъема (1977–95 гг.). Полученные фактические данные проанализированы с позиций водообменных процессов, происходящих в бассейне. Маршруты НИС и станции отбора проб показаны на рис. 9.

В ноябре 1999 г. была организована ещё одна экспедиция по программе Европейского проекта «Коперникус» для бурения и отбора керна донных осадков из залива Кара-Богаз-Гол. Работы проводились на северо-западном участке залива у пос. Бекдаш. Удалось отобрать керн диаметром 90 мм с ненарушенной структурой размером около 5,5 м. Этот керн в виде секций по 1 м в пластмассовой оболочке был доставлен в хранилище и затем использован для лабораторных анализов. Описание разрезов и анализ опытных данных были выполнены на основе определения изотопного и вещественного состава осадков, анализа содержания глинистых минералов, определения ионного состава солей водных вытяжек, анализа записи магнитной восприимчивости минералов, спорово-пыльцевого, диатомового анализа, радиоуглеродного датирования и других проведённых измерений [Ферронский и др., 1999; Куприн и др., 2003].

Было найдено, что исследуемые колонки донных осадков Южного и Среднего Каспия покрывают временной интервал до 24 тыс. лет. По минеральному и споро-пыльцевому составу нижние слои двух кернов относятся к нижнехвалынскому времени $h\nu_1$. Анализ комплекса полученных данных об изотопном составе карбонатных минералов, химическом составе водных вытяжек, а также результатов радиоуглеродного датирования и батиметрических исследований Апшеронского порога позволяют сделать ряд выводов об имевших место событиях, связанных с палеоклиматическими изменениями.

По данным радиоуглеродного возраста проб осадков, отобранных с различной глубины колонок керна из Южного и Среднего Каспия (рис. 10) построены кривые скорости осадконакопления. Здесь приращение слоя Δh по глубине колонки к соответствующему приращению времени накопления осадка Δt есть скорость осад-

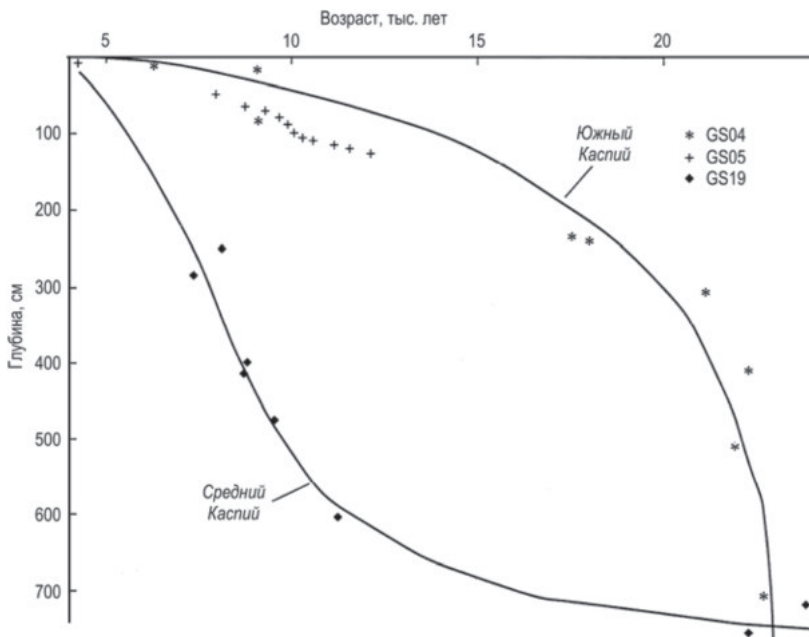


Рис. 10. Изменение скорости осадконакопления во времени по данным анализа кернов конакопления. Как видно из рисунка, скорость осадконакопления в двух бассейнах носила диаметрально противоположный характер: увеличение скорости седиментации в одном бассейне сопровождалось её снижением в другом. В интервале времени от 24 до 11 тыс. лет средняя скорость накопления осадков в Среднем Каспии была низкой и составляла 0,12 мм/год, в то время как за период с 11 до 6 тыс. лет она возрастала на порядок и составляла 1,2 мм/год. В Южном Каспии, наоборот, с 23 до 17,6 тыс. лет средняя скорость седиментации достигала 0,9 мм/год, а с 17,6 до 6 тыс. лет она снизилась в среднем до 0,19 мм/год. Объяснение этому факту можно найти, если предположить, что нарастание объёма стока рек в Средний Каспий началось лишь 11–12 тыс. лет назад. До этого времени питание бессточного моря шло за счёт стока рек с южного склона водосборного бассейна.

Предположение о смене интенсивности режима стока рек северной и южной частей водосборного бассейна подтверждается и сравнительными данными о солёности моря по водным вытяжкам. По ним найдено, что в интервале 5,4–1,5 м керна GS04 вода Южного Кас-

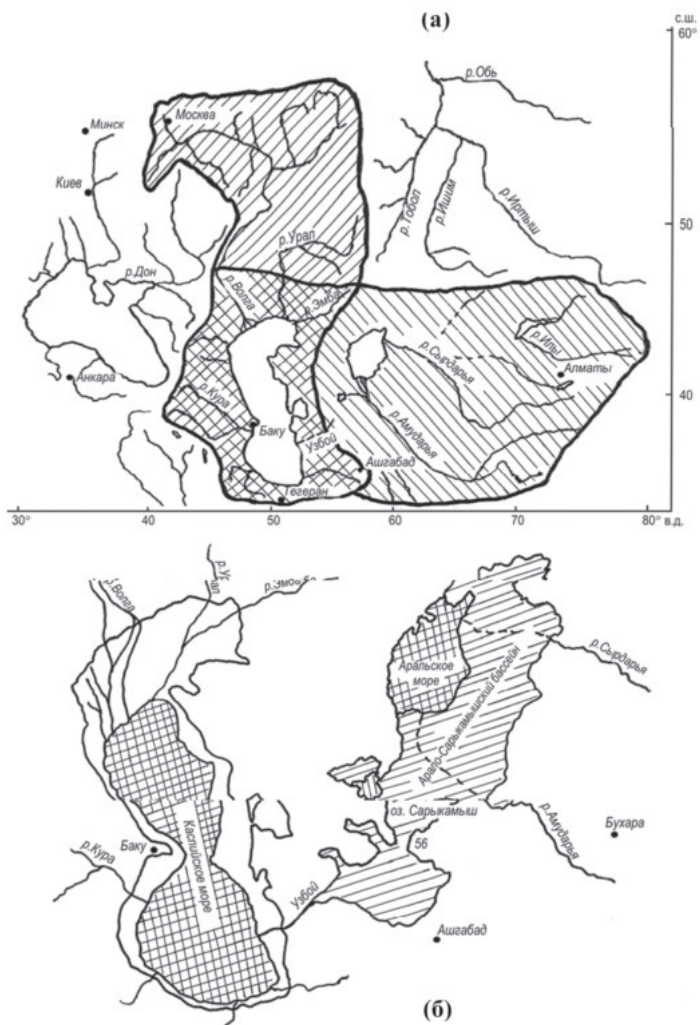


Рис. 11. Эффект широтного смещения зоны гумидного климата Арало-Каспийского региона: *а* – смена водосборного бассейна с Волго-Уральского на Амударьинско-Сарыкамышский, *б* – регрессия Каспийского и трансгрессия Аральского морей в переходный период смещения климатической зоны

пия была опреснённой по сравнению с водой Среднего Каспия. Этот интервал осадков формировался с 22,5 до 17 тыс. лет. Пополнение Южного Каспия пресной водой могло быть только за счёт речного стока с южного склона. Для Среднего Каспия по керну GS19

интервал глубин 7,5–2 м характеризуется повышенной солёностью, что свидетельствует о превышении испарения над речным стоком для этого бассейна. Данному интервалу глубин соответствует временной интервал 22,5–12 тыс. лет. Сток в Средний Каспий в этот период можно ожидать главным образом с востока и юга через Апшеронский порог и в меньшей степени с севера.

Наиболее высокая пиковая солёность в среднем бассейне отмечается дважды. Здесь она фиксируется в колонке осадков на глубинах 5,8–5,5 м и соответствует 12–15% при возрасте осадков 12–12,5 тыс. лет. В колонке южного бассейна солёность начинает расти с глубины 5,4 м и достигает пика на глубине 1,4 м, где возраст осадков также 12 тыс. лет. Однако солёность здесь достигает лишь 10%. Этот факт свидетельствует в пользу продолжавшегося в рассматриваемый период питания южного бассейна речным стоком с южного склона.

Второй пик высокой солёности в Среднем Каспии отмечался 5–6 тыс. лет назад на глубине колонки 0,5 м для южного бассейна и 6–6,5 тыс. лет на глубине 1,5 м. Наблюдается соответствующая корреляция отмеченных параметров солёности и глубины осадков с изотопными данными.

Кривые изменения изотопного состава кислорода и углерода карбонатных минералов также подтверждают идею очевидного питания южного бассейна в отмеченный интервал времени за счёт речного стока с южного склона. Этот период осадконакопления в целом характеризуется наиболее отрицательными значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$. При этом интересно отметить, что по изотопному составу вода южных рек того времени мало отличалась от воды современной Волги. Этот факт свидетельствует о широтном смещении климатического пояса современной европейской гумидной зоны в Среднеазиатский и Ирано–Кавказский регионы водосборного бассейна Каспийского моря (рис. 11).

Наконец, ещё один факт в пользу периодического питания Каспия за счёт стока рек с южного склона – документально подтверждаемое существование руслового вреза в Апшеронском пороге с очевидным преимущественным направлением водного потока в нём с юга на север.

На основе полученных экспериментальных данных можно обнаружить ряд реперных отметок, около которых находился уровень

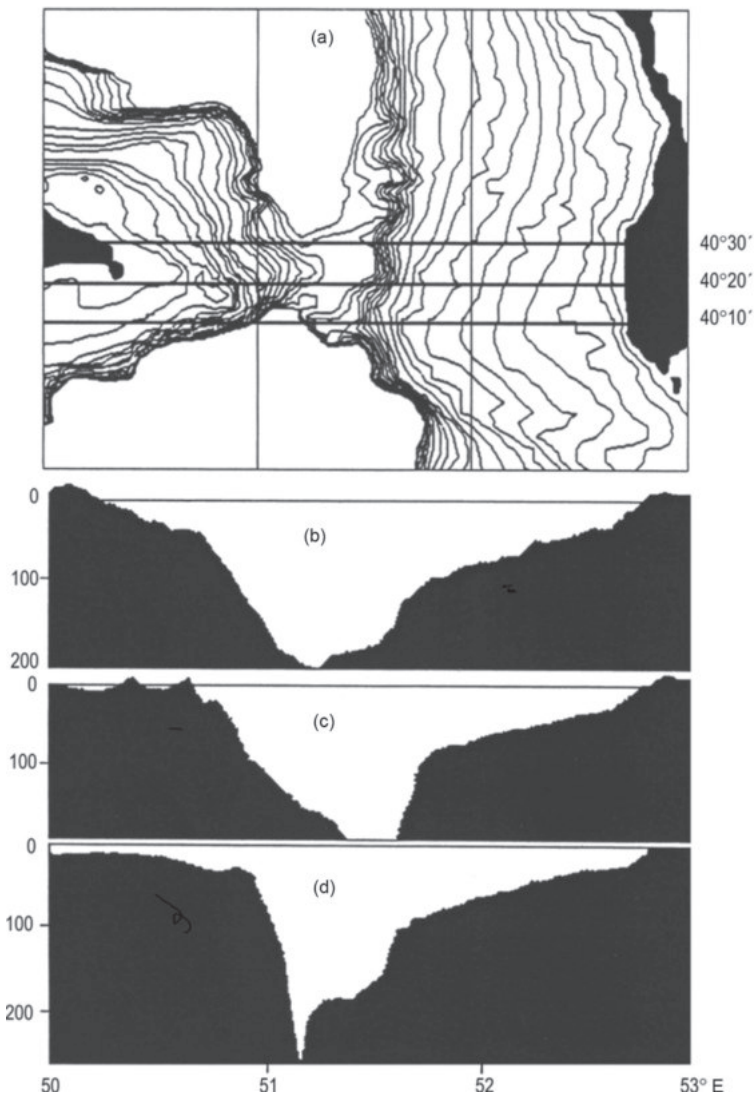


Рис. 12. Батиметрическая карта Апшеронского порога с изобатами через 10 м (а) и разрезы порога по широтам 40°10' (б), 40°20' (в), 40°30' (г)

моря в периоды его квазистационарного пребывания. По данным минерализации поровых вод на основе анализа водных вытяжек с учётом уплотнения осадков, самая низкая солёность каспийской воды составляла 5–7‰. Это событие зафиксировано на глубинах 5,4 и

7,6 м для кернов из южного и среднего бассейнов соответственно. Здесь возраст осадков для обоих кернов оказался равным 22,5 тыс. лет. Такая солёность в 2–2,5 раза ниже современной. В этом случае с учётом современного объёма Каспийского моря (80 тыс. км³) и средней солёности 13‰ объём воды в бассейне должен составлять ~200 000 км³. Элементарный подсчёт показывает, что в этот период уровень воды в море должен находиться на отметке выше современной примерно на 70 м. Вероятно, в этот период Каспийское море имело гидравлическую связь с Черноморским бассейном через Кума–Манычский водораздел.

Важную информацию для обсуждения рассматриваемых вопросов даёт анализ топографии дна Апшеронского порога [Ферронский и др., 1999; Куприн, 2002]. Его батиметрическая карта и широтные разрезы по трём сечениям приведены на рис. 12. Видно, что порог имеет русловой врез, по которому поток имел направление движения с юга на север. Об этом свидетельствует узкий, шириной всего в несколько сотен метров по дну, вход потока с юга и широкий, до 30 км, устьевой выход в Средний Каспий. В верхней, наиболее древней части русла глубиной до 80 м западный берег крутой, подмытый за счёт эффекта вращений Земли, а восточный – пологий. Ниже 80 м более крутым оказался восточный берег, очевидно, в связи с размывом более слабых пород порога и поворотом потока в северо-восточном направлении. Как видно на плане в нижней части вреза палеорусло делает петлю и снова выходит к западному берегу Среднего Каспия выше широты 40,5°. Движение потока воды с севера на юг также имело место. Об этом свидетельствует узкий врез с южной части порога до глубины ~200 м, который виден на рис. 12г.

Другая важная часть информации, которую содержит русловой врез Апшеронского порога, – выделяющиеся на разрезе речные террасы. Они служат свидетельством положения уровня моря в периоды относительно длительного квазиравновесия уровня Каспия. Выделяется наиболее древняя главная восточная терраса, расположенная на глубине 80 м от современного уровня моря. На ней на разных отметках можно выделить несколько более мелких по простиранию террас, свидетельствующих об изменениях уровня моря в ранние эпохи. Ниже 80 м на западном склоне заметны, по крайней мере, три террасы, сформировавшиеся в более позднее время.

Наиболее важные результаты выполненных исследований донных осадков и водных масс в Каспийском и Аральском морях, заливе Кара-Богаз-Гол и озере Иссык-Куль, связанные с выявлением природы гидроклиматических изменений, следующие.

1. Скорость седиментации осадков в среднем и южном бассейнах Каспийского моря носит ярко выраженный инверсионный характер, что свидетельствует о смене направления речного стока с севера на юг.

2. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатной фракции осадков Каспия показывает, что в период активного осадконакопления лёгкая по изотопному составу речная вода поступала попеременно со среднеазиатского и с европейского водосборных бассейнов.

3. Судя по химическому составу поровых вод и осадков, одинаковая солёность в двух Каспийских бассейнах отмечена лишь около 22 тыс. лет назад при интенсивном стоке воды со среднеазиатского водосборного бассейна. В этот период уровень воды в море по сравнению с современным был на 70 м выше, и Каспийское море имело гидравлическую связь с бассейном Чёрного моря.

4. Анализ перемещения и аккумуляции обломочных частиц размером от 1 до 0,63 мм позволяет выделить 8 регрессивно-трансгрессивных циклов, имевших место в Каспийском море за последние 20 тыс. лет.

5. Изучение современной динамики моря по изотопному составу водорода и кислорода на основе проведённых в 1995–96 гг. экспедиций МАГАТЭ показывает, что зафиксированный в период 1978–95 гг. подъём уровня Каспийского моря до 2,5 м не затрагивал структурных изменений водной толщи ниже 300 м. В 1996 г. на основе анализа результатов тритиевых измерений было зафиксировано изменение структуры водной толщи на самой южной станции отбора проб. Тритиевый индикатор оказался наиболее чувствительным по отношению к данному эффекту [Брезгунов, Ферронский, 2005].

6. Изучение донных осадков из залива Кара-Богаз-Гол показывает, что в период 9,2 до 8,5 тыс. лет назад водоём пересыхал, и накопление в нём осадков шло за счёт твёрдого стока реки Карын-Жарык и её притоков. Концентрация Na^+ и Cl^- , равная около 2,5–3 г/л, указывает на отсутствие связи озера со Средним Каспием. Около 8,5 тыс

лет значение $\delta^2\text{H}$ в воде упало до -6% , что свидетельствует о начале наполнения солёного водоёма речной водой. В период с 8,5 до 2,2 тыс. лет значение $\delta^2\text{H}$ в поровой воде снизилось до -17% , что указывает на увеличение объёмов речного стока. Озеро быстро наполнялось водой, и около 3 тыс. лет назад начался периодический сброс воды в Средний Каспий. После Ново-Каспийской трансгрессии около 2,2 тыс. лет р. Карын-Жарык с притоками высохла, и с тех пор залив пополняется водой из Каспийского моря.

7. По данным изучения береговых террас и донных осадков в истории Аральского моря в голоцене было отмечено четыре трансгрессии и три регрессии. Уровень воды в море поднимался до абсолютных отметок 57, 54,7, 53,5 и 53 м, а падал до 44, 43, и 35 м соответственно. Уровень моря на отметке 57 м указывает на событие, когда вода из бассейна Аральского моря сбрасывалась в бассейн Южного Каспия через р. Узбой. В керне донных осадков были найдены два слоя торфа толщиной 0,2 и 0,4 м с возрастом 4,5 и 1,3 тыс. лет соответственно. Со времени 1,3 тыс. лет и до наших дней процесс накопления осадков продолжается при переменном гидрологическом режиме и при периодическом подъёме и падении уровня моря. Эти данные подтверждаются наблюдаемым переслаиванием песчаных и глинистых осадков и периодическим появлением кристаллов солей в разрезе донных отложений.

8. Результаты изотопных, минералогических и химических исследований донных осадков озера Иссык-Куль показывают, что в период с 7,6 до 6 тыс. лет процесс седиментации протекал в условиях постоянного сброса холодной воды в р. Чу. Низкая концентрация органического углерода, моногидрокарбоната, $\delta^{18}\text{O}$ и низкие значения Sr/Ca , а также небольшое увеличение концентрации CaCO_3 и MgCO_3 на верхней границе соответствующего интервала керна подтверждает этот вывод. В период с 6 до 4,3 тыс. лет процесс седиментации продолжался, но объёмы поступавшего речного стока уменьшились, увеличилась солёность, а уровень воды в озере и скорость осадконакопления снизились. Этот вывод базируется на фактах возросшего значения $\delta^{18}\text{O}$ в раковинах моллюсков, снижения содержания Mg^{2+} выпадавших кальцитов, увеличения концентрации органического материала и отношения Sr/Ca в раковинах. По данным исследований самого верхнего интервала керна установлено, что в

период с 4,3 тыс. лет до современного происходило периодическое падение и подъем уровня озера до ложа р. Чу, через которую сбрасывался избыток озёрной воды.

9. По результатам измерений содержания $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ и датирования по ^{14}C Ясханской линзы пресных подземных вод в Западной Туркмении показано, что её минерализация менее 0,6 г/л и содержание радиоуглерода до 17–22% относительно современного сформировались около 12 тыс. лет назад, что подтверждает её генетическую связь с Арало-Сарыкамышским палеобассейном.

10. На основе изотопных исследований, которые проводились в бассейнах рек Аму Дарьи, Сыр Дарьи, Чу и Или, а также в Сирийской пустыни, было отмечено влияние плейстоценового периода на формирование подземных вод регионов Средней Азии и Ближнего Востока.

Диаметрально разные скорости осадконакопления, солёность поровых вод, изменение других седиментационных и водных характеристик Среднего и Южного Каспия, а также характер батиметрических разрезов субмаринной части Апшеронского порога свидетельствуют о том, что до недавнего времени Каспийское море было разделено сухопутным Апшеронским перешейком шириной около 50 км и представляло два изолированных озера, вода из которых при переполнении одного из них перетекала и размывала естественную перемычку. Геологическая история Апшеронского порога подтверждает этот вывод. Батиметрическое строение порога свидетельствует о том, что основное направление эродирующего потока воды было с юга на север. Полный размыв перемычки и слияние озёр в единое море, очевидно, произошли между 12 и 8 тыс. лет назад.

Аральское море сбрасывало воду в Каспий до тех пор, пока Туранская низменность была заполнена до абсолютной отметки +56 м. С 23 до 8 тыс. лет низменность была заполнена водой до этой отметки и образовывала мелководное Арало-Сарыкамышское море. И всё это время через р. Узбой у порога горы Кутунёк избыток воды поступал в Каспийское море. Теперь эродированные берега Узбоя и следы его бурной деятельности можно видеть у подножия Копет Дага.

Выявленные в Арало-Каспийском водосборном бассейне гидроклиматические изменения, а также аналогичные факты, наблюдаемые

в других регионах земного шара, привели авторов к мысли попытаться найти физические первопричины короткопериодных процессов, вызывающих эти эффекты. Следуя известному и подтверждённому наблюдениями астрономическому подходу Миланковича, в котором он связал изменения климата с широтно-долготными изменениями в распределении потока солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, было решено распространить этот подход на короткие периоды. Для этой цели потребовалось рассмотреть задачу о вращении и колебании Земли в собственном силовом поле.

Происхождение гидросферы как эффект разделения Земли на оболочки

В основе наиболее распространённых представлений об образовании Земли и других тел Солнечной системы лежит гипотеза аккреции вещества протопланетного газопылевого облака. Единого взгляда на происхождение самого газопылевого облака не существует. Одни исследователи полагают, что протопланетное облако было захвачено из межзвёздной туманности уже существовавшим Солнцем на пути своего движения в галактическом пространстве [Шмидт, 1957], другие считают, что оно является продуктом эволюции более массивного облака, из которого сформировалось само Солнце [Cameron, Pine, 1973; Cameron, 1973].

Космохимические факты, полученные в последние годы при исследовании метеоритов, Луны и планет, приводят многих исследователей к другим представлениям о процессе формирования тел Солнечной системы. Нами был выполнен анализ большого фактического материала об изотопном составе водорода и кислорода воды гидросферы на предмет выяснения условий выделения этой наиболее лёгкой оболочки планеты на стадии формирования Земли [Ферронский, 1974]. Были проанализированы многие из этих работ с целью установления пределов изменения содержания тяжёлых изотопов дейтерия (^2H) и кислорода-18 (^{18}O) в различных объектах. Результаты анализа представлены в табл. 8, где значения изотопного состава даны относительно стандарта SMOW.

При анализе изотопного состава воды в различных объектах в целом выделены следующие факты.

1. Содержание дейтерия во всех природных объектах имеет однозначную тенденцию в сторону уменьшения по сравнению с его

содержанием в океанической воде, достигая в газообразной фазе молекулярного водорода значений, характерных для атмосферы Солнца. Исключения составляют лишь углистые хондриты и лунные породы, в которых молекулярный водород в ряде случаев обогащён дейтерием.

2. Изотопный состав воды в современных океанах не свидетельствует в пользу идеи об их образовании за счёт выхода ювенильной воды из глубоких недр Земли.

3. Подземные воды обеднены ^{18}O относительно пород и минералов.

4. Гидросфера Земли в целом обогащена дейтерием и обеднена кислородом-18 относительно горных пород и минералов.

5. Метеориты и образцы лунных пород отличаются по изотопному составу от земных объектов.

В то же время пределы изменения содержания ^{18}O в образцах лунных пород близки к его значениям для земных пород аналогичного химического состава, что может свидетельствовать об общности материала, из которого происходило образование Земли, Луны и метеоритов.

Наблюдаемые закономерности распределения изотопов водорода и кислорода в природных водах, в породах и других объектах не согласуются с гипотезой аккреции холодного гомогенного вещества Земли и не подтверждают ювенильной природы её гидросферы. Исходя из тех же фактов и учитывая весьма слабые признаки наличия воды в лунных породах, приходим к выводу о том, что ювенильная вода на нашей планете отсутствует и отсутствовала ранее, а сама гидросфера является атмофильным образованием.

Результаты всесторонних космохимических исследований метеоритов, планет и Луны позволяют сделать одно общее и, пожалуй, бесспорное заключение о том, что в протосолнечном, а затем и в протопланетном облаке имел место процесс химической дифференциации исходного вещества. Этот процесс привёл к космохимическому разделению вещества между планетами, а затем и между оболочками в планетах и спутниках. Механизм этого разделения, судя по всему, был единый. В этой связи потребовалось рассмотреть процесс разделения исходного вещества с позиций гравитационного взаимодействия масс исходной туманности и её динамики, основываясь на

Таблица 8

Содержание дейтерия и кислорода-18 в природных объектах

Объект	$\delta^2\text{H}$, ‰					$\delta^{18}\text{O}$, ‰				
	-1000	-600	-200	0	+200	-60	-20	0	+20	+60
Галактика										
Солнечная атмосфера										
Земная атмосфера										
водород молекулярный										
углекислый газ										
кислород молекулярный										
атмосферные осадки										
метан										
Поверхностные воды										
кислород растворенный в воде										
вода рек и озер										
вода океанов										
Подземные воды и породы										
осадочные карбонаты и силикаты										
изверженные и метаморфические										
породы										
базальты и граниты										
рассолы										
гидротермальные воды										
пар и газ гидротерм и вулканов										
Природные органические вещества										
Метеориты										
тектиты										
хондриты										
железные метеориты										
вода углистых хондритов										
органическое вещество углистых										
хондритов										
Лунные породы										
вода в породах										
молекулярный водород										
углекислый газ										
образцы пород										

результатах спутниковых исследований гравитационного поля Земли и Луны и вытекающих из них физических следствий.

Мы обратились к результатам исследования Земли с помощью искусственных спутников (ИСЗ). За последние полвека с помощью ИСЗ и космических аппаратов получен большой объем новой информации о физике околоземного пространства и строении самой планеты.

С появлением ИСЗ и запуском специальных геодезических спутников ситуация с проведением наблюдений за движением планеты

коренным образом изменилась. По измеренным координатам орбит спутников были вычислены гармоники зональных, секториальных и тессеральных (по сферическим трапециям) гравитационных моментов в разложении гравитационного потенциала по сферическим функциям вплоть до десятых, двадцатых и выше порядков. На основе этих вычислений сделано важное научное открытие. Оно подтвердило давние предположения геофизиков о том, что Земля не находится в состоянии гидростатического равновесия, на котором основываются современные теории динамики, фигуры и внутреннего строения планеты. Аналогичное заключение было сделано и для Луны [Jeffreys, 1970; Мельхиор, 1976; Грушинский, 1976].

Для согласования модельных представлений динамики Земли и приведённых выше фактов по структуре гравитационного поля нами условие гидростатического равновесия планеты было заменено на условие динамического равновесия. Была сформулирована новая постановка задачи о динамике самогравитирующего тела в собственном силовом поле, её решению посвящены наши работы [Ферронский, Ферронский, 2007; 2012; Ферронский, 2016].

Одним из важных результатов наших исследований явилось открытие ещё одного нового закона орбитального движения планет, спутников и других тел Солнечной системы [Ферронский, Ферронский, 2012]. Суть закона состоит в том, что наблюдаемая величина средней орбитальной скорости каждой из планет и их спутников Солнечной системы равна первой космической скорости протосолнечного (протопланетного) облака, радиус которого определялся большой полуосью орбиты современной планеты (спутника). Закон справедлив для всех малых планет пояса астероидов и для всех комет. Орбитальное движение небесного тела происходит под действием энергии взаимодействия элементарных частиц внешнего потенциального поля родительского тела, при котором направление движения определяется правилом Ленца. Этот вывод подтверждается результатами астрономических наблюдений и вытекает из решения вириального уравнения Лагранжа–Якоби. Из найденного закона следует, что бытующее до сих пор представление о гравитационном притяжении взаимодействующих небесных тел оказалось умозрительным заключением. В действительности потенциальное поле небесного тела является центробежным эффектом взаимо-

действия составляющих его элементарных частиц, а материя вместе с её энергией является природным дискретно-волновым феноменом. На этой основе мы сделали вывод о том, что гравитация и инерция – это единый центробежный и равный ему центростремительный эффект взаимодействия элементарных частиц, составляющих данный материальный объект, при котором происходит перераспределение энергии взаимодействующих частиц и изменение формы их движения. Именно поэтому инертная масса равна гравитационной массе. Все остальные динамические процессы являются производными от этого эффекта. Самогравитирующее природное тело является блестящим образцом природной центрифуги [Ферронский, 2016].

Химическая дифференциация вещества при образовании планет и спутников Солнечной системы из единого облака под действием температурного перехода элементов и соединений от газообразного к жидкому и твёрдому состоянию или непосредственно из газообразной в твёрдую фазу на языке рассматриваемой динамики есть задача о разделении вещества по атомным и молекулярным массам в собственном силовом поле облака. Основой для рассмотрения такой задачи является эволюционный процесс, который связан с потерей облаком электромагнитной энергии в виде излучения, что вытекает из рассмотрения структуры потенциальной энергии неомогенной по составу элементов материальной системы.

Реальным механизмом разделения атомов и молекул по массам является пульсирующее внутреннее силовое поле, которое является механизмом генерирования потенциальной энергии [Ферронский, Ферронский, 2007, Ферронский, 2016].

Таким образом приходим к выводу, полученному на основе анализа изотопных данных о выделении гидросферы Земли как оболочки при формировании планеты при соответствующих космохимических условиях образования молекул воды в форме H_2O .

Заключение

Гидросфера является наиболее динамичной из всех оболочек Земли. С динамикой и эволюцией гидросферы обычно связывают формирование осадочного чехла земной коры. Анализ изотопных и гидрохимических данных позволяет наиболее полно понять природные условия формирования водных ресурсов, а также роль воды

гидросферы в преобразовании литосферы и в формировании полезных ископаемых. Имеющиеся экспериментальные данные об изотопном составе пород и воды в свободной и связанной форме для образцов, полученных при глубоководном бурении в Мировом океане и при бурении сверхглубоких скважин на континентах, свидетельствуют о решающей роли метеорных вод в формировании исследованных пород. Каких-либо вещественных доказательств заметного участия ювенильных вод в этих процессах не обнаружено. Напротив, накапливается всё больше фактов, свидетельствующих о решающем значении метеорных вод в течение всего геологического времени, игравших роль транспортирующего агента при крутовороте углерода, серы, азота и их соединений, а также благородных газов и других летучих компонентов верхней оболочки Земли. В этой связи при исследовании задач об эволюции изотопного состава водорода, кислорода, углерода, серы и других элементов назрела необходимость системного подхода в изучении системы мантия–литосфера–гидросфера. При этом бесспорна целесообразность изучения более широкого комплекса изотопов, включая изотопы уран–ториевых рядов, стронция, хлора, азота, лития, благородных газов и долгоживущих космогенных изотопов.

С развитием методов изучения природных вод, основанных на использовании космогенных изотопов, у исследователей появилась возможность решения принципиально новых задач, связанных с изучением динамики воды в природе в региональном и глобальном масштабе в значительном временном интервале. При этом проблема времени водообмена для некоторого природного резервуара получила разрешение как на основе прямых наблюдений, так и путём модельных теоретических представлений. Возможность исследования широкого круга задач гидрометеорологии, гидрологии, гидрогеологии и океанологии является принципиально важным достоинством направления, основанного на использовании космогенных радиоактивных изотопов.

С открытием радиоактивности у исследователей наук о Земле появились «геологические часы», используемые в геохронологии. Аналогично в науках о гидросфере космогенные и радиогенные изотопы стали инструментом для определения времени водообмена в природных резервуарах. В этой связи остаётся важной проблема

дальнейшего развития методик измерения природных концентраций и выявления закономерностей распределения в природных водах таких изотопов, как ^{22}Na , ^{26}Al , ^{32}Si , ^{35}S , ^{36}Cl , ^{39}Ar , ^{53}Mn , ^{85}Kr и др. Выполненные в этом направлении исследования являются хорошей основой для дальнейшего продолжения такой работы.

Одной из важных задач, которая нуждается в решении при использовании долгоживущих космогенных изотопов (с периодом полураспада в десятки тысяч и более лет), является выявление закономерностей их вариации во времени. Они связаны с вариациями поступления во времени потока космических лучей. Однако сами закономерности этих изменений остаются нераскрытыми.

Наконец отметим, что изучение изотопного состава воды океанов, магматических пород, вещества Луны и метеоритов, а также прогресс в развитии физических и теоретических основ динамики Земли открыли путь к решению проблемы происхождения и эволюции гидросферы с принципиально новых позиций. Вывод о конденсационном происхождении гидросферы, сделанный на основе выполненных исследований, позволяет снять многочисленные противоречия, связанные с интерпретацией экспериментальных данных об изотопном и химическом составе вещества литосферы, гидросферы и атмосферы.

Для дальнейшего расширения областей научного и практического использования изотопов назрела необходимость в расширении мониторинга как по числу исследуемых изотопов, так и по бассейнам природных вод. Такие проекты могут иметь успех лишь на основе международного сотрудничества специалистов разных стран.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Ф.А., Готтих Р.П., Саков С.А. и др. Радиохимические и изотопные исследования подземных вод нефтегазоносных областей СССР. М.: Недра, 1975. 271 с.

2. Алексеев Ф.А., Ветшттейн В.Е., Малюк Г.А. Изотопный состав водорода и кислорода подземных вод Амударьинского нефтегазоносного бассейна как критерий их генезиса и динамики // Ядерная геология. М.: ВНИИЯГ. 1974. С. 62–74

3. Бабінець А.Е., Лугова Г.П., Марус В.І. Про ізотопний склад кисню підземних вод Українських Карпат // Доповіді АН УРСР. №7, 1971. С. 579–581.

4. Батурин Г.Н. Соотношение форм миграции урана в водах некоторых рек СССР. // Докл. АН СССР. Т. 178, №3, 1968. С. 698–701.

5. Батурин Г.Н., Коченов А.В. Миграция урана в реках и время его пребывания в водах Мирового океана, морей и озёр // Геохимия. №6, 1969. С. 715–723.

6. Боровский Б.В., Карасев Б.В., Литвак Д.Р. и др. Применение радиолуглеродного метода для обоснования взаимосвязи водоносных горизонтов в районе г. Киева // Радиоизотопные методы исследований в гидрогеологии. Киев: Наукова думка, 1975. С. 17–21.

7. Боуэн Р. Палеотемпературный анализ. Л.: Недра, 1969. 207 с.

8. Брезгунов В.С. Закономерности распределения стабильных изотопов водорода и кислорода природных вод при их глобальном кругообороте // Изотопия природных вод. М.: Наука, 1978. С. 10–45.

9. Брезгунов В.С., Дебольский В.К., Нечаев В.В. и др. Особенности формирования изотопного состава кислорода и солености при смешении морских и речных вод в Баренцевом и Карском морях // Водные ресурсы. №4, 1982. С. 3–14.

10. Брезгунов В.С., Нечаев В.В., Ерохин В.С. и др. Изучение распределения стабильных изотопов водорода и кислорода в бассейне озера Иссык-Куль в связи с особенностями влагооборота в Иссык-Кульской котловине // Изотопные исследования природных вод. М.: Наука, 1979. С. 61–69.

11. Брезгунов В.С., Нечаев В.В., Романов В.В., Ферронский В.И. Исследование генезиса и динамики бассейнов крупных озёр с помощью природных изотопов // Водные ресурсы. №1, 1980. С. 110–120.

12. Бродер Д.П., Голубев Л.И., Илясов В.М. и др. Распределение трития в технологических схемах Нововоронежской АЭС // Атомная энергия. Т. 46, Вып. 2, 1979. С. 120–122.

13. Бродский А.И. Химия изотопов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 595 с.

14. Буллард Э.К. Обзор представлений о тектонике плит // Нефтегазоносность и глобальная тектоника. М.: Недра, 1978. С.9–20.

15. Ветштейн В.Е., Гуцало Л.К., Малюк Г.А. и др. К вопросу о происхождении подземных вод осадочной толщи Днепровско-Донецкой нефтегазонасыщенной провинции по данным изотопного состава кислорода и водорода // Геохимия. №3, 1973. С. 327–338.

16. Ветштейн В.Е., Малюк Г.А., Лапшин Ф.В. Изотопный склад кисню и водню мінеральних вод Українських Карпат як критерій їх генезису // Доповіді АН УРСР. №12, 1972. С. 1062–1066.

17. Ветштейн В.Е., Малюк Г.А., Русанов В.П. Распределение кислорода-18 в воде центральной части Арктического бассейна // Океанология. Т. XIV, Вып. 4, 1974. С. 642–648.

18. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 215 с.

19. Виноградов А.П. Образование океана // Известия АН СССР. (Серия геология) №4. 1967. С. 3–9.

20. Войткевич Г.В. Проблемы радиогеологии. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 351 с.

21. Годубев Л.И., Илясов В.М., Лурье А.И., Мехедов Б.Н. Содержание трития в теплоносителе реакторов ВВЭР // Атомная энергия. Т. 46, Вып. 2, 1979. С. 79–81.

22. Горбушина Л.В., Тыминский В.Г., Спиридонов А.И. К вопросу о механизме образования радиогидрогеологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значение при прогнозе землетрясений. // Сов. геология. №1, 1972. С. 153–156.

23. Горбушина Л.В., Тыминский В.Г. Радиоактивные и стабильные изотопы в геологии и гидрогеологии. М.: Атомиздат, 1974. 104 с.

24. Гордиенко Ф.Г., Котляков В.М. О соотношении климатического и гляциологического факторов формирования палеотемператур материковых ледников // Проблемы палеогидрологии. М.: Наука, 1976. С. 282–283.

25. Гритченко З.Г., Флегонтов В.М., Флейшман Д.Г. Радиоактивные выпадения ^7Be и ^{22}Na в районе Ленинграда в 1960–1973 гг. // Космогенные радиоактивные изотопы. Вып.3. Вильнюс: Изд-во ИФМ АН ЛитССР. 1975. С. 71–81

26. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976.

27. Дергачев В.А., Кочаров Г.Е. Вековой цикл временных вариаций концентрации радиоуглерода в атмосфере Земли // Low-radioactivity measurements and applications. Proc. Symp. 1977. P. 279–286.

28. Клеро А.К. Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики / Пер. с франц. М.; Л., АН СССР, 1947.

29. Коченов А.В., Батурич П.Н. Распределение урана в осадках Аральского моря // Океанология. Т. 7, Вып. 4, 1967. С. 623–627.

30. Кочерав Г.Е. Изотопный состав корпускулярных потоков Солнца и земной атмосферы // Космогенные радиоактивные изотопы. Вып. 3. Вильнюс: ИБ АН ЛитССР. 1975. С. 5–16.

31. Кузнецов Ю.В., Легин В.К., Лисицын А.Р. и др. радиоактивность океанических взвесей. 2. Уран в океанических взвешях // Радиохимия. Т. 9, Вып. 4, 1967. С. 498–499.

32. Куприн П.Н., Ферронский В.И., Поповчак В.П. и др. Состав донных осадков Каспийского моря как показатель изменения его водного режима. // Водные ресурсы. Т. 30. №2. 2003. С. 154–172.

33. Ле Пишон К., Франшто Ж., Боннин Ж. Тектоника плит. М.: Мир, 1977. 287 с.

34. Дуянас В.Ю. К вопросу о скорости возникновения космогенных радионуклидов // Космогенные радиоактивные изотопы. Вып. 3. Вильнюс: ИФМ АН ЛитССР. 1975. С.17–25.

35. Мельхиор П. Физика и динамика планет / Пер. с франц. М: Мир, 1976.

36. Муди Дж. Размещение и особенности геологического строения нефтяных месторождений-гигантов // нефтегазоносность и глобальная тектоника. М.: Недра, 1978. С. 209–220.

37. Пельмегов С.В., Мунаев Э., Бондаренко Г.Н. Изотопно-геохимические исследования подземных вод в краевой части артезианского бассейна // Сов. геология. №4, 1978. С. 119–125.

38. Пиннекер Е.В. Значение изотопных определений при изучении месторождений подземных вод (на примере Восточной Сибири) // Месторождения подземных вод Иркутской области. Л.: Недра, 1974. С. 14–31.
39. Пиннекер Е.В. Формирование современных гидротерм в областях потухшего вулканизма (в свете изотопных данных) // Гидротермальный процесс в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1975. С. 38–43.
40. Пиннекер Е.В., Ветштейн В.Е., Дзюба А.А. и др. Содержание кислорода-18 в рассолах Сибирской платформы // Очерки по гидрогеологии Сибири. Новосибирск: Наука, 1973. С. 86–92.
41. Поляков В.А., Селецкий Ю.Б., Якубовский А.В. и др. Дейтерий в водах типа «Нафтуса» // Тр. ВСЕГИНГЕО. Вып. 59. М.: Недра, 1974. С. 80–87.
42. Романов В.В. Закономерности распределения трития в природных водах // Изотопия природных вод. М.: Наука, 1978. С. 46–89.
43. Романов В.В. Применение природного трития для изучения перемешивания морских и речных вод // Водные ресурсы. №5, 1982. С. 22–26.
44. Романов В.В., Кикичев Х.Г. Тритий в атмосферном водороде // Изотопные исследования природных вод. М.: Наука, 1979. С. 85–92.
45. Романов В.В., Кикичев Х.Г. Определение доли морского и континентального водяного пара в приземном слое воздуха северо-западной акватории Чёрного моря с помощью тритиевых исследований // Исследование природных вод изотопными методами. М.: Наука, 1981. С. 111–114.
46. Селецкий Ю.Б., Поляков В.А., Якубовский А.В. и др. Дейтерий и кислород-18 в подземных водах. М.: Недра, 1973. 144 с.
47. Соيفер В.Н., Брезгунов В.С., Веролов В.И. и др. Применение изотопного метода для изучения процессов водообмена озера Байкал // Тр. Лимнол. ин-та СО АН СССР. 1970. Т. 14. С. 146–153.
48. Соколовский А.Г., Поляков В.А., Голубкова Е.В. Изотопно-лёгкие воды Азово-Кубанского артезианского бассейна: условия формирования и бальнеологическое значение // Разведка и охрана недр. №5. 2007. С. 44 – 47.
49. Старик И.Е., Колядин Л.Б. Об условиях существования урана в океанической воде // Геохимия. №3, 1957. С. 204–213.
50. Стыро Б.И. Самоочищение атмосферы от радиоактивных загрязнений. Л.: Гидрометеиздат, 1968, 288 с.
51. Стыро Б.И., Шпиркаускайте И.К., Купцов В.М. Высотные распределения ^{238}U , ^{232}Th и ^{239}Pu в атмосферных выпадениях // Атомная энергия. Т. 29, Вып. 2, 1970. С. 135–136.
52. Тарасов М.Г. Вопросы происхождения и формирования вод мезокайнозойских отложений Предкавказью по данным изотопного состава водорода и кислорода // Материалы геологического изучения земной коры Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1978. С. 62–68.
53. Тейс Р.В., Найдин Д.П. Палеотермометрия и изотопный состав кислорода органических карбонатов. М.: Наука, 1973. 254 с.

54. Ткачук В.Г., Ветштейн В.Е., Малюк Г.А. и др. Изотопный состав водорода и кислорода подземных рассолов Припятской впадины и возможности его использования в нефтегазовой гидрогеологии // Геохимия. №7, 1975. С. 999–1006.

55. Ферронский В.И. О происхождении гидросферы земли по данным об изотопном составе воды // Водные ресурсы. №4, 1974. С. 21–34.

56. Ферронский В.И. Неусреднённая теорема вириала для природных систем // Электронный журнал МФТИ «Исследовано в России». Веб-сайт: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2008/066.pdf> (С. 712–715 русская версия. С. 716–719 английская версия).

57. Ферронский В.И., Брезгунов В.С., Власова Л.С. и др. Исследование водообменных процессов в Каспийском море на основе изотопных и океанографических данных. // Водные ресурсы. Т. 30, №1, 2003, С. 15–28.

58. Ферронский В.И., Брезгунов В.С., Власова Л.С. и др. Изменение водного режима зал. Кара-Богаз-Гол, оз. Иссык-Куль и Аральского моря по данным изучения донных осадков. // Водные ресурсы. Т. 30, №3, 2003. С. 281–288.

59. Ферронский В.И., Власова Л.С., Есиков А.Д. и др. Вариации изотопного состава подземных вод, атмосферных осадков и органического вещества аллювиальных отложений в связи с колебаниями климата // Водные ресурсы. №5, 1982. С. 3–25.

60. Ферронский В.И., Иванова Л.Ю., Кикичев Х.Г. и др. О возможности использования трития для изучения глобальных циркулирующей атмосферной влаги // Водные ресурсы. №5. 1980. С. 144–152

61. Ферронский В.И., Данилин А.И., Дубинчук В.Т. и др. Радиоизотопные методы исследования в инженерной геологии и гидрогеологии. М.: Атомиздат, 1977. 308 с.

62. Ферронский В.И., Дубинчук В.Т., Поляков В.А. и др. Природные изотопы гидросферы. М.: Недра, 1975. 278 с.

63. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. М.: Научный мир, 2009. 632с.

64. Ферронский В.И., Поляков В.А., Куприн П.Н., Лобов А.Л. Природа колебания уровня Каспийского моря (по результатам изучения донных осадков // Водные ресурсы. Т. 26., №6, 1999. С. 652–666.

65. Ферронский В.И., Поляков В.А., Романов В.В. Космогенные изотопы гидросферы. М.: Наука, 1984. 278 с.

66. Ферронский В.И., Ферронский С.В. Происхождение и эволюция Солнечной системы. М.: Научный мир, 2012. 288 с.

67. Ферронский В.И. Гравитация, инерция, невесомость. М.: Научный мир, 2016. 306 с.

68. Ферронский В.И., Поляков В.А., Ферронский С.В. Вариации изотопного состава воды в гидрологическом цикле как инструмент изучения механизма климатических изменений // Водные ресурсы. №3, 1993. С. 285 – 295.

69. Ферронский В.И., Ферронски С.В. Динамика Земли. М.: Научный мир, 2007. 336 с.

70. Ферхуген Дж. Тернет Ф., Вейс Л. и др. Земля: Введение в общую геологию. Т. 2. М.: Мир, 1974. С. 389–483.

71. Чердынцев В.В. Уран-234. М.: Атомиздат, 1969. 308 с.

72. Alder B., Oeschger H., Wasson Y.T. Aluminium-26 in deep-sea sediments // Radioactive dating and methods of low-level counting. Proc. Symp. IAEA. 1967. P. 189–195.

73. Appa Rao M.V.K. The ${}^3\text{He}({}^3\text{He}+{}^4\text{He})$ ratio in primary cosmic radiation // J. Geophys. Res. V. 67, 1962. P. 1289–1392.

74. Bentley H.W., Phillips F.M., Davis S.N. et al. Chlorine-36 dating of very old groundwater. 1. The Great Artesian Basin, Australia. // Waret Resour. Res. V. 22. 1986. P. 1991 – 2001.

75. Bien G.S., Suess H.E. Transfer and exchange of ${}^{14}\text{C}$ between the atmosphere and the surface water of the Pacific Ocean // Radiocarbon Dating and Methods of Low-Level Counting. Proc. Symp. IAEA. 1967. P. 105–115.

76. Bochaler P., Eberhardt P., Geiss J. et al. Tritium in lunar materials // Proc. 2nd Lunar Sci. Conf. V. 2., 1971. P. 1803–1812.

77. Bowen R. Isotopes and climayes. London: Elsevier, 1991. 483 p.

78. Cambray R.S., Fishar E.M., Peirson D.H. et al. Radioactive fallout in air and rain: results to end of 1978. Harwell: AERE. R-9441. 1979. 50 p.

79. Cameron A.G.W. Accumulation processes in the primitive Solar nebulae // Icarus. V. 18, 1973. P. 407–450.

80. Cameron A.G.W., Pine M.R. Numerical models of the primitive Solar nebulae // Ibid. V. 18, 1973. P. 377–406.

81. Cotecchia V., Tasioli G.S., Vaari G. Isotopic measurements in research on seawater ingression in the carbonate aquifer of the Salentine peninsula, Southern Italy // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA, V.1, 1974. P. 445–463.

82. Craig H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide // Geochim. et Cosmochim. Acta. V. 12, 1957. P.133–149.

83. Craig H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters // Ibid. V. 133, 1961 b. P. 1833–1834.

84. Craig H., Gordon L. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere // Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. Spoleto, 1965. P. 9–130.

85. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. V. 19, 1964. P. 435–463.

86. Dansgaard W., Johnson S.J., Müller J. et al. One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet // Science. V. 166, 1969. P. 377–380.

87. Dinzer T., Noory M., Javed A.R.K. et al. Study of groundwater recharge and movement in shallow and deep aquifers in Saudi Arabia with stable isotopes and salinity data // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA, V.1, 1974. P. 364–374.

88. Dinzer T., Payne B.R. An environmental isotope study of the southwestern karst region of Turkey // J. Hydrol. V. 13, 1971. P. 233–258.

89. Drost W., Mozer H., Neumaier F. et al. Isotopenmethoden in der Grundwasserkunde. // Inf. 61, Büro Eurisotop. Brussels. 1972. S. 178.

90. Dudev N.D., Malewski R.L., Rymas S.L. Tritium yield from fast-neutron fission of ^{235}U // *Trans. Amer. Nucl. Soc.* V. 15, 1972. P. 483.
91. Emiliani C. Pleistocene paleotemperatures // *Science.* V. 168, 1970. P. 822–824.
92. Emiliani C. The cause of the ice ages // *Earth and Planet. Sci. Lett.* V. 37., 1978. P. 349–352.
93. Epstein S., Mayeda T. Variation of ^{18}O content of waters from natural sources // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* V. 4, 1953. P. 213–214.
94. Epstein S., Buchbaum R., Lowenstam L., Urey H. Carbonate-water isotopic temperature scale // *Bull. GSA.* V. 62, 1951. P. 417–426.
95. Epstein S., Buchbaum R., Lowenstam L., Urey H. Revised carbonate-water isotopic temperature scale // *Ibid.* V. 64, 1953. P. 1315–1325.
96. Epstein S., Sharp R.P., Gow A.J. Antarctic ice sheet: stable isotope analyses of Bird Station cores and interhemispheric climatic implications // *Science.* V. 168, 1970. P. 1570–1572.
97. Fairbridge R.W. The importance of limestone and its Ca/Mg content to paleoclimatology // *Intersciences Letters.* 1964. P. 431–478.
98. Fairhall A.W., Buddemeir R.W., Yang I.A., Young Y.A. Radiocarbon from nuclear testing and air-sea exchange of CO_2 // *Antarctic J.* V. 4, 1969. P. 14–18.
99. Fairhall A.W., Young Y.A. Radiocarbon in the environment // *Radionuclides in the Environment. Adv. Chem. Ser. № 93. Am. Chem. Soc.* 1969. P. 401–418.
100. Fireman E.L. Radioactivities in meteorites and cosmic-ray variation // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* V. 31, 1967. P. 1197–1206.
101. Fireman E.L., Stoenner R.W. Carbon and carbon-14 in lunar soil 14163 // *Proc. 12 Lunar and Planet Sci. Conf. N.Y.:* V. 12, 1982. P. 559 – 565.
102. Fontes J.Ch. Les isotopes du milieu dans les laux naturels // *Le Houille Blanche.* № s, 1976. P. 205–221.
103. Friedman I., Hardcastle K. Interstitial water studies, Leg. 15, isotopic composition of water // *Initial Rep. DSDP.* 1973. V. 20. p. 901–903.
104. Friedman I., Redfield A.C., Schoen B. et al. The variation of the deuterium content of natural waters in the hydrologic cycle // *Rev. Geophys.* V. 2, 1964. P. 177–224.
105. Fritz P., Drimmie R.J., Render F.W. Stable isotope contents of a major prairie aquifer in central Manitoba, Canada // *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology* // *Proc. Symp. IAEA,* V. 1, 1974. P. 379–396.
106. Fröhlich K., Jordan H., Herbert D. Radioactive Umveltisotope in der Hydrologie. Leipzig: Grundstoffindustrie, 1977. 92 s.
107. Gat J.R., Carmi I. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area // *J. Geophys. Res.* V. 75, 1970. P. 3039–3078.
108. Gat J.R., Tzur Y. Modification of the isotopic composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge // *Isotope Hydrology. Proc. Symp. IAEA.* 1967. P. 49–60.
109. Gat J.R., Gonfiantini R., Tongiorgi E. Atmosphere-surface water interaction // *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. IAEA.* 1968. P. 175–184.

110. Gillespie R., Polach Y.A. The suitability of marine shells for radiocarbon dating of Australian prehistory // Radiocarbon Dating. Berkeley: Univ. Calif. Press, 1979. P. 404–421.

111. Gonfiantini R., Dinzer T., Derekoj A.M. Environmental isotope hydrology in the Bodna region, Algeria // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA. V. 1, 1974 a. P. 293–316.

112. Gonfiantini R., Conrad C., Fontes J.Ch. et al. Etude isotopique de la nappe du Continental intercalaire et de ses relations avec les autres nappes du Sahara septentrional // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA. V. 1, 1974 b. P. 227–240.

113. Gonfiantini R., Gallo G., Payne B.R. et al. Environmental isotope and hydrochemistry in groundwater of Gran Canaria // Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology // Adv Group Meet. Vienna: IAEA. 1976. P. 159–170.

114. Gray D.C., Damon P.E. Sunspots and radiocarbon dating in the Middle ages // Scientific Methods In Medieval Archeology. Berkeley: Univ. Calif. Press, 1970. P. 167–182.

115. Hagemann F.J., Grey J., Machta L., Turkevich A. Stratospheric carbon-14, carbon dioxide, tritium // Science. V. 130, 1959. P. 542–552.

116. Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry. N.Y.: Springer, 1973. 135 p.

117. Imbrie J. A theoretical framework for the Pleistocene in ages. // Journal Geol. V.142, 1985. P. 417–432.

118. Jeffreys H. The Earth: Its origin, history and physical constitution (5th ed.) Cambridge Press. 1919.

119. Keeling C.D. The carbon dioxide cycle: reservoir models to depict the exchange of atmospheric carbon dioxide with oceans and land plants // Chemistry of the lower atmosphere. N.-Y.: Plenum Press, 1972. P. 251–329.

120. Kinman T.D. An attempt to detect deuterium in the solar atmosphere // Month. Not. Roy. Astrophys. Soc. V. 116, 1956. P. 77.

121. Klein F., Sommerfeld A. Theorie des Kreisels. Hefte III, Leipzig: Teubner, 1903.

122. Lal D., Peters B. Cosmic-ray-produced radioactivity on the Earth // Encycl. Phys. V. 46, 1967. P. 551–612.

123. Lal D., Nijampurkar V.N., Rama S. Silicon-32 hydrology // Isotope Hydrology. Proc. Symp. IAEA. 1970. P. 847–863.

124. Libby W.F. Radiocarbon Dating. Chicago: Univ. Press, 1955. 186 p.

125. Locante J. Tritium in pressurized water reactor // Trans. Amer. Nucl. Soc. V. 14, 1971. P. 161–162.

126. Merlivat L. D'étude quantitative de bilans de lacs à l'aide des concentrations en deuterium et oxygen-18 dans leau // Isotope Hydrol. Proc. Symp. Vienna: IAEA, 1970. P. 89–107.

127. Miskel J.A. Production of tritium by nuclear weapons // Tritium. Eds. A. Moghissi and M. Carter. Phoenix: Las Vegas. Messenger Graphics, 1973. P. 79–85.

128. Müller P., Wagner K. Dating soil layers by ¹⁰B // Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting. Proc. Symp. IAEA. 1967. P. 177–187.

129. Mook W.G. Stable carbon and oxygen isotopes in natural waters in the Netherlands // Isotope Hydrol. Proc. Symp. IAEA. 1970. P. 163–189.

130. Мьннич К.О., Vogel J.C. Investigation of meridional transport in the troposphere by means of carbon-14 measurements // Radiocarbon Dating. Proc. Symp. IAEA. 1963. P. 189–197.

131. Nydal R., Ливсетх К., Gulliksen S. A survey of radiocarbon variation in nature since the Test Ban Treaty // Radiocarbon Dating. Berkely: Univ. Calif. Press, 1979. P. 313–323.

132. O'Neil J.R. Stable isotope geochemistry of rocks and minerals // Lectures in Isotope Geology. Eds. E. Jäger, J.C. Hunziker. N.Y.: Springer, 1979. P. 235–263.

133. Panichi C., Ferrara G.C., Gonfiantini R. Isotope geothermometry in the Larderello geothermal field // Geothermics. V. 5, 1977. P. 81–88.

134. Panichi C., Nuti S., Noto P. Use of isotopic geothermometers in the Larderello geothermal field // Isotope Hydrology. Proc. Symp. IAEA. V. 2, 1979. P. 613–629.

135. Redfield A.C., Friedman I. Factors affecting the distribution of deuterium in the ocean // Proc. Symp. Mar. Geochim. 1964. P. 149–168.

136. Sakai H., Matsubaya O. Stable isotope studies of Japanese geothermal systems // Ibid. V. 5, 1977. P. 97–123.

137. Salati E., Leal J.M., Campos M.M. Environmental isotopes used in a hydrological study of Northeastern Brazil // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA. V. 1, 1974. P. 259–282.

138. Savin S.M. The history of the Earth's surface temperature during the past 100 m.y. // Ann. Rev. Earth. Planet. Sci. V. 5, 1977. P. 319–355.

139. Schmidt U. Molecular hydrogen in the atmosphere // Tellus. V. 26, 1974. P. 78–90.

140. Sehgal B.R., Rempert H.H. Tritium production in fast reactors, containing B_4C // Trans. Amer. Nucl. Soc. V. 14, 1971. P. 779–780.

141. Sternberg R.S., Damon P.E. Sensitivity of radiocarbon fluctuations and inventory to geomagnetic and reservoir parameters // Radiocarbon Dating. Berkely: Univ. Calif. Press, 1979. P. 691.

142. Stuiver M., Suess H.E. On the relations between radiocarbon dates and true sample ages // Radiocarbon. V. 8, 1966. P. 534–540.

143. Suess H.E. Tritium geophysics as an international research project // Science. V. 163, 1969. P. 1705–1410.

144. Taylor J.R., Pefers F.E. Tritium transport in LMFBR's // Trans. Amer. Nucl. Soc. V. 15, 1972. P. 431–432.

145. Thatcher L.L., Payne B.R. The distribution of tritium in precipitation over continents and its significance to groundwater dating // Radiocarbon and Tritium Dating. Proc. 6th Inter. Conf. Wash.: USAEC. 1965. P. 604–629.

146. Webber W. The spectrum and charge composition of the primary cosmic radiation // Encycl. Phys. V.46, 1967. P. 181.

147. Yurtsever Y., Gat J.R. Stable isotopes in atmospheric waters // Stable Isotope Hydrology. Eds. J.R. Gat and R. Gonfiantini. Vienna: IAEA, 1981. P. 103–142.

148. Yurtsever Y., Payne B.R. Application of environmental isotopes to groundwater investigations in Qatar // Isotope Hydrology 1978. Pros. Symp. IAEA. V. 2, 1979. P. 465–490.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Развитие идей стохастической гидрологии в ИВП РАН

М.В. Болгов

Методы гидрологии, основывающиеся как на генетических представлениях о формировании стока, так и на вероятностных моделях его пространственно-временной изменчивости, получили существенное развитие благодаря работам С.Н. Крицкого, М.Ф. Менкеля, Д.В. Коренистова, Е.Г. Блохинова, И.О. Сарманова, Д.Я. Ратковича, В.Е. Привальского и многих других учёных и инженеров Института водных проблем АН СССР и РАН за 50 лет его существования.

Во многих классических работах прошлого столетия была доказана стохастическая природа гидрометеорологических процессов, предопределяющая необходимость их вероятностного описание во времени и пространстве. Большое значение для развития стохастической гидрологии в последние десятилетия имела разработка в ИВП теории корреляции для негауссовых процессов, к которым относятся все составляющие водного баланса, в том числе речной сток. Существенный прогресс в области построения стохастических моделей стока связан с циклом работ О.В. Сарманова [1, 2], начатых в Математическом институте им. Стеклова, и получивших развитие в Институте водных проблем [4]. О.В. Сарманов представил решение уравнения Маркова в виде билинейного разложения по совокупностям собственных функций ядра интегрального уравнения. На основе этой работы И.О. Сармановым была доказана фундаментальная теорема, являющаяся основой создания теории нестационарных марковских гамма-процессов, названных автором процессами винеровского типа [4]. Полученные двумерные плотности позволяют построить семейство трёхпараметрических гамма-корреляций, определяющих марковские гамма-процессы.

Из числа других стохастических моделей, развивавшихся применительно к многолетним колебаниям стока рек, в том числе и в ИВП, следует отметить процессы авторегрессии и скользящего среднего. Следует отметить цикл работ В.Е. Привальского с соавторами [5].

Из безусловных законов распределения величин речного стока обсуждались, в основном, различные модификации гамма-распре-

деления, среди которых необходимо указать в первую очередь распределение Крицкого и Менкеля, получаемое путем степенной замены переменной в гамма-распределении. Из числа трудностей, до конца не преодоленных для безусловных законов, следует упомянуть проблему усечения распределений. Гидрологическая значимость теории усеченных распределений определяется возможностью обработки генетически неоднородных совокупностей. Для гамма-распределенных величин Е.Г. Блохиновым [6], а затем Л.Ф. Сотниковой [7] исследовался случай усечения в медиане (точке с обеспеченностью 50%). Усечение трёхпараметрического распределения в произвольной точке рассмотрено в работе М.В. Болгова и И.О. Сарманова [8].

Следующий важный аспект стохастической гидрологии – применение моделированных рядов составляющих водного баланса в гидрологических и водохозяйственных расчётах. Начало этим исследованиям было положено в нашей стране работами Г.Г. Сванидзе [9], А.Ш. Резниковского [10], А.В. Рождественского [11], но в работах Д.Я. Ратковича [12, 13] предложен метод моделирования, отвечающий рекомендуемой им модели: линейной корреляции между обеспеченностями стока смежных лет. При необходимости моделирования системы взаимозависимых рядов расчеты существенно усложняются; Способ моделирования многомерных случайных величин был также предложен Д.Я. Ратковичем [13] и развит далее С.В. Музылёвым и А.В. Фроловым [14], М.В. Болговым [15]. В основу предлагаемого приёма положена идея привести исходную задачу к моделированию вспомогательных автокоррелированных, но взаимонезависимых последовательностей.

Использование в гидрологических и водохозяйственных расчётах стохастических моделей связано с определением (оценкой) их параметров по рядам наблюдений ограниченной продолжительности (в гидрологии, как правило, менее 100). Исследование статистических свойств оценок параметров и разработка методов, позволяющих получать «наилучшие» результаты, составляет важнейший этап гидрологического расчёта.

Оценкам параметров распределений свойственны как систематические ошибки (смещение), так и случайные. Очевидно, нужно стремиться к получению несмещённых оценок при минимальных

случайных ошибках. Теория оценивания параметров распределения вероятностей, применительно к задачам гидрологии, рассматривалась в ряде работ ИВП [6, 16]. В последние годы исследовался вопрос оценивания параметров распределения Крицкого и Менкеля методом линейных моментов Хоскинга [17].

При описании экстремальных величин стока основные трудности возникают при оценивании асимметрии. С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем [18] показано, что существенное уточнение в ряде случаев достигается при совокупном (групповом) анализе материалов наблюдений. Объединённый анализ гидрологических и метеорологических наблюдений, относящихся к различным объектам, имеет целью установить общие всем объектам рассматриваемой группы закономерности, проявляющиеся в колебаниях величин стока, атмосферных осадков и т.п. Это позволяет увеличить объём эквивалентно независимой информации, содержащейся в объединяемых данных наблюдений, по которым оцениваются характеристики гидрологического режима. В результате, несмотря на внесение в расчёт некоторых условностей и допущений, можно при определённых соотношениях повысить точность гидрологического расчёта.

Рассмотрим основные результаты более подробно.

Марковские стохастические модели внутрирядной корреляции стока рек

Процессы Маркова являются математической моделью, достаточно адекватно отражающей свойства реальных процессов, с одной стороны, а с другой – удобным средством для различного рода расчётов. В работах Института рассматривалась следующая задача. При заданном одномерном (маргинальном) распределении $p(x)$ и степенном характере затухания корреляций построить согласованную с ними двумерную плотность $p(t, x, y)$. Решение этой задачи основывается на фундаментальном результате О.В. Сарманова [2], который формулируется в следующем виде:

Для того, чтобы плотность $p(t, x, y)$ стационарного случайного процесса удовлетворяли уравнению Маркова с заданными маргинальными распределениями, достаточно, чтобы она имела вид

$$p(t, x, y) = p(x)p(y) \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\lambda_k t} \varphi_k(x) \varphi_k(y) \right], \quad (1)$$

где $0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots$ любая монотонная числовая последовательность (необязательно бесконечная), а $\phi_k(x)$ – ортонормированная с весом $p(x)$ система собственных функций интегрального оператора

$$\int_{\Omega} \frac{p(t, x, y) \phi(x) dx}{\sqrt{p(x)p(y)}} = \lambda \phi(y), \quad y \in \Omega, \quad (2)$$

Область Ω изменения аргументов x и y совпадает с областью значений случайного процесса $x(t)$. При этом λ_k – соответствующие собственные значения.

В работах ИВП РАН исследовались следующие конкретные двумерные законы распределения: гамма-распределение и равномерное распределение.

Билинейное разложение по полиномам Лагерра [19].

$$f_1(x, y) = \frac{x^\alpha e^{-x}}{\Gamma(\alpha+1)} \frac{y^\alpha e^{-y}}{\Gamma(\alpha+1)} \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} R^k L_k^\alpha(x) L_k^\alpha(y) \right], \quad (3)$$

где $R = \exp(-\lambda)$ – коэффициент корреляции между гамма-распределёнными величинами.

Билинейное разложение по полиномам Лежандра.

Пусть x и y – случайные величины, имеющие каждая равномерное распределение в промежутке $[-1, 1]$ и соответственно плотности $f_1(x) = 1/2, f_2(x) = 1/2$. Ограничимся в билинейном разложении по системе ортонормированных полиномов Лежандра первыми тремя членами. В таком случае двумерная плотность запишется в виде [20]:

$$f(u, v) = 1 + 3\lambda(2u-1)(2v-1) + 5/4 \lambda^2 [3(2u-1)^2 - 1][3(2v-1)^2 - 1], \quad (4)$$

где $\lambda = \exp(-\alpha)$ – коэффициент корреляции равномерно распределённых в $[-1, 1]$ случайных величин. И.О. Сармановым [20] показано, что разложение (4) сохраняет вероятностный смысл при выполнении следующего условия:

$$-0,55 \leq \lambda \leq 0,55.$$

Условная функция распределения записывается в виде:

$$F(u, v) = u + 3\lambda(2u-1)(u^2-u) + 5/4 \lambda^2 [3(2u-1)^2 - 1](2u^3 - 3u^2 + u). \quad (5)$$

Условная дисперсия не зависит от v , и, следовательно, корреляция (4) гомоскедастична.

Переход от корреляции равномерно распределённых величин к корреляции с заданными маргинальными распределениями рассмотрен И.О. Сармановым [21]. Пусть $f(u, v)$ – двумерная плотность для системы равномерно распределённых в $[0, 1]$ случайных зависи-

мых величин ξ_1, η_1 . Рассмотрим случайные величины ξ, η , задаваемые равенствами

$$\xi_1 = \int_{\alpha}^{\xi} p(x) dx = F(\xi), \quad \eta_1 = \int_{\alpha}^{\eta} p(y) dy = F(\eta), \quad (6)$$

где $p(x) > 0$ – заданная плотность распределения в отрезке $[a, b]$. В таком случае плотность $f_1(x, y)$ определяется в виде билинейного разложения:

$$f_1(x, y) = p(x)p(y) \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda^k P_k[F(x)]P_k[F(y)] \right\}. \quad (7)$$

где λ – коэффициент корреляции между $F(\xi)$ и $F(\eta)$, а $P_k()$ – k -тый полином Лежандра.

Начиная с работ Ефимовича, Крицкого, Менкеля, последовательности годовых значений речного стока принято рассматривать как реализации марковского процесса. Поскольку корреляционная теория случайных процессов развивалась в те годы в основном для гауссовского случая, то и заимствованные гидрологией методы либо ограничивались нормальным приближением, либо основывались на преобразовании классического нормального закона распределения (А.В. Рождественский, 1977; В. Клемеш, 1974; Н.А. Картвелишвили, 1975)..

В целом марковская модель может быть принята в качестве практически приемлемого приближения для многолетних колебаний стока, но желательно выяснить, какое из марковских решений наилучшим образом удовлетворяет имеющимся натурным данным. С целью обоснования приемлемой модели колебаний стока Д.Я. Ратковичем [12], был выполнен сравнительный анализ массовых материалов наблюдений за стоком неозёрных рек Земного шара с использованием последовательности независимых случайных величин и четырех модификаций простой цепи Маркова. Исследования Ратковича показали, что наилучшее приближение к натуре даёт модификация простой цепи Маркова с линейной корреляцией между обеспеченностями последовательных величин стока.

Важнейшее значение в задаче идентификации стохастической модели стока имеет определение числового параметра рекомендуемой модели – коэффициента автокорреляции, выборочные оценки которого, при коротких рядах наблюдений, статистически мало

достоверны. Ратковичем было выдвинуто предположение о допустимости нормировать коэффициент автокорреляции в зависимости от какой-то интегральной характеристики, по возможности отражающей влияние всех указанных причин, вызывающих коррелированность рядов годового стока. Обобщение материалов наблюдений за стоком около 400 рек Земного шара позволило установить [12], что для неозёрных рек наиболее отчётливо прослеживается зависимость первого коэффициента автокорреляции ($r(1)$) от модуля стока. Эта идея получила подтверждение в последующих работах, в которых методом совместного анализа были получены региональные оценки ($r(1)$). Сравнение осреднённых для регионов РФ значений модулей и коэффициентов автокорреляции подтвердило наличие такой зависимости [24].

Периодически коррелированные стохастические модели сезонных колебаний стока

Успехи стохастического направления в начальный период работы ИВП связаны, в основном, с исследованиями колебаний годового стока и колебаниями уровней замкнутых морей. Однако во многих случаях сезонный ход процессов становится определяющей характеристикой гидрометеорологического режима.

В работах специалистов Института рассматривались весьма разнообразные по сложности предложения по моделированию гидрологических процессов с сезонным ходом. Большое число подходов к этой проблеме рассмотрено в работе В.Е. Привальского и др.[5]. Упомянутые модели с различной степенью достоверности воспроизводят свойства натуральных рядов. Однако, в отличие от стохастических моделей годового стока, при исследовании его сезонного хода практически не изучались степень соответствия натурным данным как двумерных, так и многомерных моделей (законов распределения), а также свойства стохастических моделей, за некоторым исключением, не обсуждается вопрос об их оптимальной сложности.

Теоретически задача построения стохастической модели стока не имеет единственного решения уже на уровне двумерных законов распределения (при заданных одномерных), что в сочетании с негауссовостью последних требует тщательного исследования как свойств самих моделей, так и оценки их адекватности натурным данным.

При стохастическом моделировании речного стока с интервалом дискретности менее года целесообразно рассматривать его как нестационарный случайный процесс с параметрами, период изменения которых равен 12 месяцам. Первая и весьма важная проблема – нормализация распределений стока, так как распределения вероятностей среднемесячных расходов характеризуются повышенной асимметрией и удовлетворительно аппроксимируются трёхпараметрическим гамма-распределением Крицкого–Менкеля.

Переход от гамма-распределённых величин к нормально распределённым возможен несколькими способами. Одним из наиболее распространённых является приём, сводящийся к вычитанию сезонного хода из натурального ряда и последующему нормированию. Получающийся после таких преобразований ряд рассматривается как стационарный и представляется в виде обычной авторегрессионной модели.

$$Q_i = \Phi_1 Q_{i-1} + \dots + \Phi_p Q_{i-p} + \zeta_i \quad (8)$$

где ζ_i – взаимонезависимые и одинаково распределённые гауссовские случайные величины. В таком случае говорят об авторегрессионной модели с сезонным ходом (САР-модель по терминологии [5]).

Естественное усложнение САР-модели состоит в подгонке авторегрессионной модели, своей для каждого месяца. Оценив авторегрессионные параметры и дисперсию ошибки аппроксимации для каждого месяца, получим периодическую авторегрессионную модель (ПАР-модель).

Вид выборочных АКФ показывает, что для каждого месяца необходимо выбирать (назначать) свой порядок сложности модели. При наличии значимой автокорреляции стока смежных лет ($r(1) > 0,2$), а это реки большей части территории бывшего СССР, порядок моделей отдельных месяцев должен в нашем случае назначаться исходя из сохранения заданного коэффициента корреляции между годовыми значениями (Сванидзе, 1977, Болгов, 1996).

Вид автокорреляционных функций периодически коррелированного процесса колебаний речного стока весьма сложен ввиду генетической неоднородности его составляющих в различные сезоны года и чисто марковская модель не может быть использована. Тем не менее на «Марковской» основе было предложено усложне-

ние простейшей модели. Автокорреляционные функции периодов устойчивого питания для исследуемых районов характеризуются быстрым убыванием до сдвига по времени, равного единице, а затем более замедленным спадом. В таком случае можно рекомендовать стохастическую модель в виде смеси двух процессов – простой цепи Маркова и последовательности независимых случайных величин (белый шум). Для половодных месяцев можно ограничиться одним из этих компонентов.

Таким образом, для стохастического описания колебаний стока с интервалом дискретности один месяц рекомендуется модель в виде суммы двух процессов – марковской последовательности и белого шума [25].

Итак, обратимся к автокорреляционной функции. Рекомендуемой модели соответствует следующее аналитическое выражение

$$R(\tau) = ae^{-\alpha\tau} + (1-a)\delta(\tau). \quad (9)$$

Выражение (9) содержит два параметра – a и α , которые необходимо определять методом наименьших квадратов с использованием ординат автокорреляционной функции за предшествующий период, равный году. Как показали имитационные эксперименты, сохранение в модели медленного затухания корреляционной функции для стока периодов устойчивого питания является необходимым условием воспроизведения свойств колебаний стока во всем интервале частот (в диапазонах многолетних и сезонных колебаний).

Усечённое трёхпараметрическое гамма-распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля

Получение одномерных распределений вероятностей стока является важнейшей задачей стохастической гидрологии. В связи с ограниченностью анализируемых выборок в данной задаче гидрологии реализуется весьма консервативный подход, поскольку её решение в существенной мере определяет надёжность проектируемых сооружений. Тем не менее гидрологи весьма часто озадачиваются проблемой поиска распределений, наилучшим образом удовлетворяющих имеющимся эмпирическим данным. Известны попытки А.В. Ежова построить распределение на основе принципа максимума энтропии [26], а также некоторые другие подходы. Функции распределения с «тяжёлым» хвостом были получены В.И. Найдёновым

при попытке учесть механизм обратной связи в уравнении водного баланса, обобщённые кривые Г.П. Калинина [28] основывались на аппроксимации обширного эмпирического материала. Н.А. Картвелишвили [23] рассмотрела обобщённое распределение Пуассона для выборок, содержащих нулевые значения. В последующих работах была предложена стохастическая модель экстремумов стока в виде смеси двух распределений: усечённого в медиане нормального закона и закона распределения Парето (Болгов и др., 1998). Рекомендованная модель хорошо воспроизводила основные черты гистограммы распределения паводочных расходов воды, однако большое число параметров приводило к вычислительной неустойчивости задачи оценивания этих параметров. К тому же в ряде случаев эта модель приводила к очень большим значениям стока в зоне малых обеспеченностей. В последние годы обсуждается применение в гидрологических расчётах лог-пирсоновского распределения вероятностей, широко используемого в инженерной практике США [30].

Одним из эффективных подходов к решению задачи аппроксимации распределений является применение теории усечённых выборок. Гидрологические аспекты усечения распределения С. Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля достаточно подробно обсуждались в работах ИВП [6, 7, 8]. Рассмотрим в качестве примера усечение распределения Крицкого-Менкеля. Если существует плотность вероятности случайной величины ξ , которую обозначим через $f(\xi)=F'(\xi)$, где

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(\xi) d\xi, \quad (10)$$

то плотность усечённого в точке k распределения случайной величины ξ определяется по формуле:

$$f_k(x) = \frac{f(x)}{1-F(k)} = \frac{f(x)}{q} = cf(x), \quad (11)$$

где $c=1/q$, q – вероятность события $\xi \geq k$, т.е. вероятность превышения (обеспеченность).

Пусть $F(x)$ – функция, а $f(x)$ – плотность трёхпараметрического гамма-распределения, т.е.

$$f(x) = \left[\frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{\gamma/b} \frac{1}{\Gamma(\gamma|b|x_0)} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{\gamma/b-1} \exp \left[-\frac{x}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b}, \quad (12)$$

где x_0 , γ и b – параметры.

Найдём параметры усечённого распределения, выразив их через параметры исходного распределения.

Согласно (10) и (11) плотность $f_k(x)$ усечённого в точке k трёхпараметрического гамма-распределения имеет вид:

$$f_k(x) = \frac{1}{1-F[k]} \left[\frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{\gamma/b} \frac{1}{\Gamma(\gamma|b|x_0)} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{\gamma/b-1} \exp \left[-\frac{x}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b} \quad (13)$$

Начальный момент m_1 первого порядка равен

$$m_1 = \frac{1}{q} \int_k^\infty x f_k(x) dx = c \int_k^\infty x \left[\frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{\gamma/b} \times \frac{1}{\Gamma(\gamma|b|x_0)} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{\gamma/b-1} \exp \left[-\frac{x}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b} dx \quad (14)$$

Сделаем замену переменной $z = \left[-\frac{x}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b}$ и введя обозначение, $a = \frac{x_0 \Gamma(\gamma)}{\Gamma(\gamma+b)}$ получим после некоторых преобразований

$$m_1 = c \int_z^\infty a z^b \frac{z^{\gamma-1}}{\Gamma(\gamma)} e^{-z} dz = ac \frac{\Gamma(b+\gamma)}{\Gamma(\gamma)} [1 - \Gamma(z_1 b + \gamma)], \quad (15)$$

где

$$z_1 = \left[-\frac{\kappa}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b}, \quad \Gamma(\alpha, \beta) = \int_0^\alpha e^{-t} t^{\beta-1} dt. \quad (16)$$

Начальный момент k -го порядка

$$m_k = c \int_k^\infty x^k f_k(x) dx = ca^k \int_z^\infty z^{\kappa b} \frac{z^{\gamma-1}}{\Gamma(\gamma)} e^{-z} dz = ca^k \frac{\Gamma(\kappa b + \gamma)}{\Gamma(\gamma)} [1 - \Gamma(z_\kappa, \kappa b + \gamma)]. \quad (17)$$

По формулам, связывающим начальные и центральные моменты, получим дисперсию и асимметрию усечённой величины.

Двустороннее усечение трёхпараметрического гамма-распределения

Если случайная величина ξ подчиняется трёхпараметрическому гамма-распределению, то плотность распределения величины η , получаемой из ξ усечением в точках κ_1 и κ_2 , имеет вид

$$f_{\kappa_1, \kappa_2} = \frac{f(\xi)}{F(\kappa_2) - F(\kappa_1)} \quad (18)$$

в интервале $[\kappa_1, \kappa_2]$ и равна нулю вне этого интервала. Выразим параметры усечённого распределения через параметры исходной

плотности (13). Первый начальный момент (или математическое ожидание) усечённой случайной величины равен

$$m_1 = A(\kappa_1, \kappa_2) \int_{\kappa_1}^{\kappa_2} x f(x) dx, \quad (19)$$

где $A(\kappa_1, \kappa_2) = [F(\kappa_2) - F(\kappa_1)]^{-1}$.

Выполнив замену переменной, получим усечённое гамма-распределение для случайной величины η с плотностью распределения $f_{\kappa_1, \kappa_2}(z)$ в пределах от z_1 до z_2 :

$$f_{\kappa_1, \kappa_2}(z) = \frac{A(z_1, z_2)}{\Gamma(z)} z^{\gamma-1} e^{-z}, \quad (20)$$

где

$$z_\kappa = \left[-\frac{\kappa_\kappa}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b}, \quad \kappa = 1, 2,$$

выражение для начального момента κ -го порядка получаем в следующем виде:

$$m_\kappa = A(z_1, z_2) a^\kappa \frac{\Gamma(\gamma + \kappa b)}{\Gamma(\gamma)} [\Gamma(z_2, \gamma + \kappa b) - \Gamma(z_1, \gamma + \kappa b)],$$

где $a = \frac{x_0 \Gamma(\gamma)}{\Gamma(\gamma + b)}$, а в квадратных скобках записана разница неполных гамма-функций соответствующих аргументов.

Теория экстремальных событий для аппроксимации распределений

В работах ИВП применительно к максимальным расходам воды были исследованы два распределения, появившиеся сравнительно недавно в результате обобщения теории экстремальных статистик: обобщённое распределение Парето (GPD) и обобщённое распределение экстремумов (GEV) [31] и др. Класс всех функций $F(x)$, для которых предельное распределение нормированного максимума при некотором выборе констант имеет одну и ту же функцию распределения $H(x)$, называют **областью притяжения** этой $H(x)$. Доказано, что функции распределения $H(x)$, определяющие все возможные области притяжения, можно описать (с точностью до параметра сдвига и масштабного параметра) однопараметрическим семейством:

$$H_\xi(x) = \begin{cases} \exp(-(1+\xi x)^{-1/\xi}), & -\infty < \xi < +\infty, \xi \neq 0, 1+\xi x > 0; \\ \exp(-\exp(-x)), & \xi = 0, -\infty < x < +\infty. \end{cases} \quad (21)$$

Распределение (1.6.2) называется **стандартным обобщённым распределением экстремальных значений**. Параметр ξ называют **параметром формы распределения**. При $\xi > 0$ выражение (1.6.2) даёт распределение Фреше (его плотность убывает как степень $(1+1/\xi)$); при $\xi = 0$ (2) совпадает с двойным экспоненциальным законом (распределением Гумбеля), а при $\xi < 0$ (1.6.2) даёт распределение Вейбулла, ограниченное справа значением $-1/\xi$. Необходимые и достаточные условия, обеспечивающие принадлежность функции $F(x)$ к области притяжения распределения (21) с тем или иным значением параметра формы ξ можно найти в [32].

GPD возникает в задаче определения предельного распределения больших значений, превышающих некоторый порог u . Поскольку как **GEV**, так и **GPD** зависят по существу лишь от поведения функции распределения $F(x)$ при больших значениях аргумента, эти два распределения оказываются тесно связанными:

$$G(x|\xi, s) = 1 + \ln(H_\xi(x/s)) = 1 - (1 + \xi x/s)^{-1/\xi},$$

где $G(x|\xi, s)$ обозначает **GPD** без параметра сдвига.

Параметр формы ξ , как мы видим, представляет наибольший интерес при анализе экстремальных значений. Отметим, что для положительных ξ хвост распределения **GPD** убывает степенным образом как $1/x^{1/\xi}$.

Основные результаты попыток применения теории экстремальных статистик к рядам максимальных расходов воды рек дождевого питания можно сформулировать в следующем виде.

1. Для рассматриваемого класса природных процессов не всегда возможно предложить модель распределения максимальных расходов воды, одинаково хорошо воспроизводящую особенности гистограммы во всём диапазоне изменения аргумента.

2. Приложение теории экстремальных статистик в гидрологии предполагает выяснение характера поведения гистограммы в её хвостовой части и указание диапазона применения той или иной модели распределения. Используемая в данной статье основная идея заключается в том, что из рассматриваемой теоретической схемы следует вывод о предпочтении так называемого **GPD**-распределения для «хвостов» распределений экстремумов. Очевидно, что **GPD** модель действует, начиная лишь с некоторого порогового значения, и поэтому необходимо решать весьма сложную задачу поис-

ка оптимального значения этого порога (точки усечения, как принято называть её в гидрологической литературе).

Важнейший аспект статистического анализа – технология индивидуального оценивания. Для «тяжёлохвостовых» распределений обычные моменты могут не существовать (в данной задаче уже начиная со второго порядка) и поэтому рекомендуются либо оценки наибольшего правдоподобия, либо оценки по методу L-моментов, использующему соотношения между параметрами распределений и порядковыми статистиками, оцениваемыми по выборке.

Оценивание параметров распределений методом L-моментов

Рассмотрим основные положения метода L-моментов, опираясь на результаты [17]. Пусть случайная величина X имеет функцию распределения $F(x)$ и функцию квантилей $x(F)$, обратную по отношению к $F(x)$. Расположим ряд из n из наблюдений значений в возрастающем порядке $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq x_{3:n} \dots, \leq x_{n:n}$.

L-моменты порядка r определяются соотношением

$$\lambda_r = r^{-1} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} E x_{r-k:r}, \quad r=1, 2, \dots, \quad (22)$$

где E – математическое ожидание. Математическое ожидание порядковой статистики может быть представлено в виде:

$$E x_{j:r} = \frac{r!}{(j-1)!(r-j)!} \int_0^1 x [F(x)]^{j-1} [1-F(x)]^{r-j} dF(x). \quad (23)$$

Первые несколько L-моментов могут быть представлены в виде

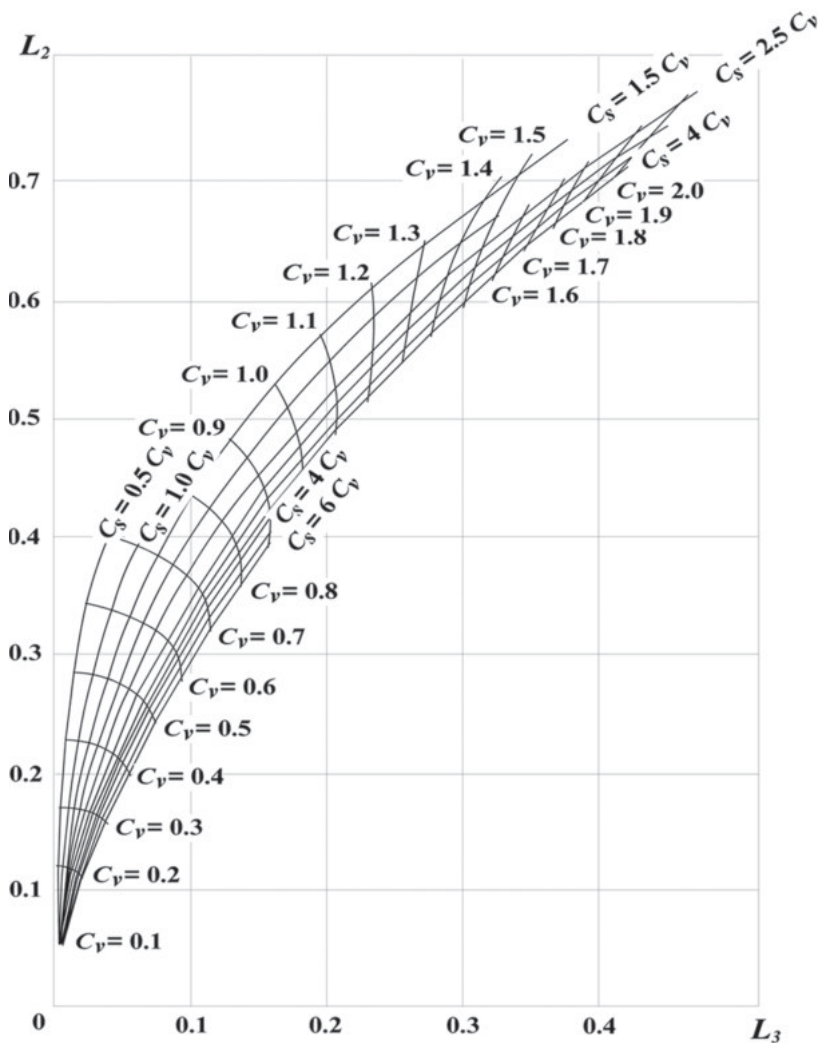
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= EX = \int_0^1 x(F) dF, \quad \lambda_2 = \frac{1}{2} E(X_{2:2} - X_{1:2}) = \int_0^1 x(F)(2F-1) dF, \\ \lambda_3 &= \frac{1}{3} E(X_{3:3} - X_{2:3} - X_{1:3}) = \int_0^1 x(F)(6F^2 - 6F + 1) dF, \quad (24) \\ \lambda_4 &= \frac{1}{4} E(X_{4:4} - 3X_{3:4} + X_{2:4} - X_{1:4}) = \int_0^1 x(F)(20F^3 - 30F^2 + 12F + 1) dF. \end{aligned}$$

Выборочные оценки L-моментов могут быть найдены с помощью следующих соотношений:

$$l_1 = n^{-1} \sum_i x_i, \quad l_2 = \frac{1}{2} \binom{n}{2}^{-1} \sum_{i>j} (x_{i:n} - x_{j:n}), \quad (25)$$

$$l_3 = \frac{1}{3} \binom{n}{3}^{-1} \sum_{i>j>k} \sum \sum (x_{i:n} - 2x_{j:n} + x_{k:n}), \quad (25)$$

$$l_4 = \frac{1}{4} \binom{n}{4}^{-1} \sum_{i>j>k>l} \sum \sum \sum \sum (x_{i:n} - 3x_{j:n} + 3x_{k:n} - x_{l:n}).$$



Номограммы для определения параметров трёхпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля методом L-моментов. L_2 и L_3 – выборочные оценки второго и третьего L-моментов

Для ряда законов распределения, наиболее часто употребляемых на практике, в [17] приводятся соотношения между параметрами этих распределений и L-моментами. Таким образом, оценив по выборке порядковые статистики λ_k , можно найти соответствующие оценки искомых параметров. Поскольку оценки методом L-моментов основаны на порядковых статистиках, они обладают «робастностью» по сравнению с оценками, основанными на обычных моментах.

С целью упрощения использования метода L-моментов в практических расчётах построена номограмма для определения параметров распределения $(C_v, C_s/C_v)$ трёхпараметрического гамма распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (рис.). Для её построения было произведено численное интегрирование выражений λ_2 и λ_3 (24) при заданных C_s и C_v с помощью таблиц ординат С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля.

Марковские процессы в задаче прогнозирования уровня внутреннего водоёма

Одной из наиболее сложных гидрологических задач является моделирование и прогнозирование уровня замкнутого водоёма. Являясь интегральной характеристикой, уровень бессточного водоёма весьма чувствителен к поведению процессов, определяющих приходные и расходные компоненты водного баланса на длительных временных интервалах.

Дифференциальное уравнение водного баланса Каспийского моря, при некоторых практически приемлемых предположениях имеет вид [33]:

$$dh/dt = -\alpha h(t) + g(t), \quad (26)$$

где h – уровень моря, отсчитываемый относительно некоторой нулевой отметки; α – параметр инерционности, зависящий от крутизны берегов и g – результирующая процессов притока и испарения с поверхности моря за вычетом осадков на ее поверхность. Предполагается также, что g – стационарный марковский процесс с известным коэффициентом автокорреляции и дисперсией, а отток в залив Кара-Богаз-Гол учитывается путём корректировки математического ожидания притока.

Решение уравнения (26) возможно двумя путями. Это так называемый ланжевенковский подход, подробно рассмотренный в [33] и развитый в последние годы в ряде работ А.В. Фролова [34, 35]. Заметим,

что на практике широкое распространение получили численные (имитационные) методы решения уравнения (26), позволяющие учитывать разнообразные нелинейные зависимости, такие как вид зависимости площади зеркала от уровня моря, зависимость испарения от уровня моря, взаимную корреляцию притока и испарения, нелинейную зависимость оттока в КБГ от уровня и т.п. [36].

При реализации Ланжевенковского подхода сложно получить вид условного распределения, поскольку соответствующие уравнения записываются для параметров (моментов) распределения.

Если же мы рассмотрим исходное уравнение (26) как стохастическое, то из вида его коэффициентов уже можно делать вывод о характере распределения уровня моря. Линейный вид первого слагаемого и константа (единица) перед побуждающим процессом позволяют сделать вывод о гауссовости искомого распределения. Остаётся вычислить оценки параметров условных плотностей.

Теория СДУ предполагает, что в правой части (26) имеется белый шум, корреляционной функцией которого является δ -функция. Известно, что автокорреляция речного притока существенно сказывается на дисперсии колебания уровня моря, поэтому её игнорирование невозможно (сильно огрубляет решение). Для учёта эффекта, связанного с автокорреляцией, вводится фиктивный белый шум, интенсивность которого увеличивается и вычисляется по формуле [37].

$$N_0 - 4 \int_{-\infty}^{\infty} k_g(\tau) dt, \quad (27)$$

где k_g – ковариационная функция побуждающего процесса g .

Располагая интенсивностью N_0 и коэффициентами уравнения (26), рассматриваемого как стохастическое дифференциальное уравнение, получим численное решение задачи вероятностного прогноза уровня моря.

Непредсказуемый характер поведения уровня Каспийского моря стимулировал исследователей на поиск более сложных моделей, объясняющих экстремальные перепады уровня моря. Основные гипотезы опирались на возможный нелинейный характер зависимости испарения с водной поверхности Каспия от его уровня, нелинейную зависимость площади зеркала от его уровня. Можно отметить работы В.И. Найдёнова и И.А. Кожевниковой [39]. Основываясь на представлении о наличии «потенциальных ям» [40], авторы

получили бимодальное распределение уровня Каспийского моря. Результаты иных расчётов показали, что учёт нелинейного характера морфометрии чаши уровня, выявленного с помощью цифровой модели рельефа, на распределение уровня моря существенного влияния не оказывает [41]. Введение же в уравнение баланса моря зависимости испарения с водной поверхности от его уровня приводит к неправдоподобно большим отклонениям уровня от нормы на обозримую перспективу.

Основной вывод заключается в том, что существенно уменьшить доверительный интервал долгосрочного прогноза уровня моря в современных условиях не представляется возможным. Описанные выше методы применялись в ИВП и к другим водоёмам, характеризующимся слабо предсказуемыми многолетними колебаниями уровня воды (трансграничное озеро Ханка, «пульсирующее» озеро Чаны, озеро Далай-Нор в КНР и др.).

Байесовские решения для оценки вероятностных характеристик стока в нестационарных условиях

Данные мониторинга свидетельствуют о том, что на территории РФ имеют место существенные изменения стока, в основном во внутригодовом разрезе. Наблюдается заметное увеличение стока зимней межени и уменьшение стока весеннего половодья, т.е. происходит перераспределение стока внутри года, что, с одной стороны, облегчает решение водохозяйственных задач, а с другой – требует развития методов обработки нестационарных последовательностей речного стока.

Следует отметить, что имеющиеся гидрологические ряды слишком коротки для построения сложных вероятностных моделей только статистическими методами. Построить матрицу вероятностей перехода из одного устойчивого состояния, длящегося несколько десятков лет, в другое, наблюдавшееся также в течение десятилетий, невозможно, поскольку мы имеем дело только с одним случаем смены состояния. Таких случаев должно быть несколько десятков и только тогда можно говорить и о распределении вероятностей времени пребывания системы в одном из состояний, и об оценке матрицы переходных вероятностей. Как правило, мы располагаем двумя-тремя состояниями, что вынуждает применять на практике простейшие гипотезы, к обсуждению которых мы вернемся ниже.

Обратимся к проблеме учёта нескольких условно стационарных состояний при прогнозировании стоковой характеристики на период эксплуатации проектируемого объекта. Здесь в первую очередь надо обсудить характер стохастической модели, позволяющей воспроизводить моменты смены состояний процесса.

В прикладных разделах теории случайных процессов известны стохастические модели с несколькими устойчивыми состояниями, но в случае многолетних колебаний стоковых характеристик такие модели вряд ли могут быть применены. Физически обоснованных гипотез, подтверждающих наличие таких устойчивых состояний, в современной гидрологии пока ещё не предложено.

В нашем случае имеется только два состояния процесса и мы можем лишь предположить, что с вероятностями n_1/N и n_2/N система может находиться в одном из них. Здесь $n_1+n_2=N$, где N – общая продолжительность неоднородной выборки.

Относительно будущих колебаний стока мы можем только утверждать, что с соответствующими вероятностями система может находиться в одном из двух состояний. В таком случае можно предположить, что математическое ожидание прогнозируемого процесса является смесью двух распределений [42], [43]:

$$\tilde{p}(\theta/x) = \frac{n_1}{N} \cdot \eta(\theta, n_1) + \frac{n_2}{N} p(\theta/x), \quad (28)$$

где $\eta(\theta, n_1)$ – выборочное распределение среднего (математического ожидания) для первого условно стационарного участка длиной n_1 , а $p(\theta/x)$ – апостериорная плотность байесовской оценки θ для новых климатических условий. Нетрудно заметить, что плотность (28) является двухмодальной, поскольку выборочная плотность математического ожидания является гауссовской, а апостериорная плотность $p(\theta/x)$ при малой дисперсии также близка к нормальному закону.

Окончательный этап байесовского оценивания (прогнозирования) состоит в вычислении прогнозной плотности по формуле полной вероятности. В этом случае смесь распределений (28) будет выступать в качестве апостериорного распределения, а модельным распределением будет двухпараметрическое гамма-распределение с параметром γ , равным среднему значению для обеих выборок:

$$\pi(y) = \int_0^{\infty} P(y, \gamma, \theta) \cdot \tilde{p}(\theta/x) d\theta. \quad (29)$$

Полученная прогнозная плотность распределения $\pi(y)$ уже не будет являться гамма-распределением и вычисляется путём численного интегрирования уравнения (29).

В будущем, если система перейдет в третье состояние, отличающееся от двух предыдущих, процедуру можно повторить ещё раз, записав уравнение (28) для трёх компонентов.

Понятно, что прогнозная плотность (29), не является полным заданием случайного процесса, поскольку представляет собой лишь одномерный закон распределения и может быть использована только для назначения расчётных значений параметров (квантилей) с учётом возможного нестационарного поведения процесса.

Заключение

За 50 лет существования ИВП РАН в работах его сотрудников получили существенное развитие методы стохастической гидрологии и получены важнейшие результаты, которые вместе с достижениями других научных школ (ГИ, МГУ, РГГМУ) позволили создать современный арсенал гидрологии, обеспечить решение крупных водохозяйственных задач.

Существенные результаты были получены в задачах описания многолетних колебаний стока, в теории экстремальных гидрологических событий, в теории колебания уровней замкнутых водоёмов, в задаче оценивания параметров стохастических моделей стока. На основе полученных результатов создавались и корректировались нормативные документы, определяющие методы решения широкого круга прикладных задач. Но возникли и новые задачи, в основном связанные с последствиями климатических изменений для гидрологических систем. Актуальной и слабо исследованной является проблема вероятностного прогнозирования стока для новых нестационарных условий. Соответственно возникает задача и регулирования стока в нестационарных условиях его колебаний. Эти и многие другие задачи составят предмет гидрологических исследований в ИВП РАН в обозримом будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сарманов О.В. Собственные корреляционные функции и их применения в теории стационарных марковских процессов. // Доклады АН СССР. Т. 132, №4, 1960. С. 769–772.

2. Сарманов О.В. Исследование стационарных марковских процессов методом разложения по собственным функциям // Тр. МИАН. 1961. С. 239–261.
3. Сарманов О.В., Сарманов И.О. Основные типы корреляции, применяемые в гидрологии // М.: Наука, 1983. 200 с.
4. Сарманов И.О. Процесс гамма-корреляции и его свойства // Доклады Академии Наук СССР. Т. 191, №1, 1970. С. 30–32.
5. Привальский В.Е., Панченко В.А., Асарина Е.Ю. Модели временных рядов с приложениями к гидрометеорологии. // Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. 226 с.
6. Блохинов Е.Г. Распределение вероятностей величин речного стока // М.: Наука, 1974. 169 с.
7. Сотникова Л.Ф. Опыт применения усечённого гамма-распределения к расчёту максимального стока рек // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. М.: Наука, 1973. С. 56–86.
8. Болгов М.В., Сарманов И.О. Усечённое трёхпараметрическое гамма-распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля и некоторые его приложения к гидрологическим расчётам. // Водные ресурсы. №2, 1988.
9. Сванидзе Г.Г. Моделирование теоретического гидрологического ряда методом Монте-Карло // Сообщ. АН Груз. ССР. Т. 26, №5, 1961. С. 565–572.
10. Резниковский А.Ш., Александровский А.Ю., Атурин В.В. и др. // Гидрологические основы гидроэнергетики. М.: Энергия, 1979. 232 с.
11. Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 270 с.
12. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 256 с.
13. Раткович Д.Я. Моделирование взаимозависимых гидрологических рядов (на примерах притока к Аральскому и Азовскому морям) // Водные ресурсы. №1, 1977. С. 5–15.
14. Музылёв С.В., Фролов А.В. О статистическом моделировании многомерных гидрологических процессов // Водные ресурсы. №3, 1978. С. 14–21.
15. Болгов М.В. Моделирование многомерных гидрологических характеристик методом разложения по естественным ортогональным функциям. // Метеорология и гидрология. №7, 1994.
16. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1981. 255 с.
17. Hosking J.R.M. L-moments: Analysis and estimation of distribution using linear combination of order statistics // J. Roy. Statist. V. 52, №1, 1990. P. 105–112.
18. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О методике совместного анализа наблюдений за стоком гидрологически сходных бассейнов // Тр. ГГИ. Вып. 180, 1970. С. 3–29.
19. Блохинов Е.Г., Сарманов О.В. Гамма-корреляция и её использование при расчётах многолетнего регулирования речного стока. // Тр. ГГИ. Вып. 14. Л.: Гидрометеиздат, 1968. С. 52–75.

20. Сарманов И.О. Построение корреляции между равномерно распределёнными случайными величинами // Тр. ГПИ. Вып. 160, 1968. С. 81–89.

21. Сарманов И.О. О корреляции между функциями зависимых случайных величин, имеющих гидрологическое приложение // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. М.: Наука, 1973. С. 87–103.

22. Klemes V., Boruvka L. Simulation of Gamma-distributed First-order Markov Chain // Water Resources Research. V. 10, №1, 1974. P. 87–91.

23. Картвелишвили Н.А. Стохастическая гидрология. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 162 с.

24. Болгов М.В. Лобода Н.С., Николаевич Н.Н. Пространственное обобщение параметров внутрирядной связности рядов годового стока // Метеорология и гидрология. №7, 1993.

25. Болгов М.В. Нестационарная стохастическая авторегрессионная модель гидрологических процессов с сезонным ходом // Водные ресурсы. 23(1), 1996.

26. Рождественский А.В., Ежов А.В., Сахарюк А.В. Оценка точности гидрологических расчётов. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 279 стр.

27. Найдёнов В.И., Кожевникова И.А. Почему так часто происходят наводнения? // Природа. №9, 2003.

28. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1968.

29. Болгов М.В., Писаренко В.Ф. О распределении максимальных расходов воды рек Приморья // Водные ресурсы. 26(6), 1999. С. 710–721.

30. Болгов М.В., Сарманов И.О. Логгаммовое распределение вероятностей и его приложения в гидрологических расчётах // Водные ресурсы. 23, №2, 1996.

31. Embrechts P., Kluppelberg C., Mikosch T. Modeling Extreme Events. Berlin: Springer, 1977. 645 p.

32. Bobbee B., Ashkar F. The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology. Toronto: Water Res. Public. 1991. 203 p.

33. Музылёв С.В., Привальский В.Н., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 174 с.

34. Фролов А.В. Влияние автокоррелированности речного притока и видимого испарения на уровеньный режим озера // Метеорология и гидрология. №4, 1989. С. 94–101.

35. Фролов А.В. Влияние возобновления оттока в Кара-Богаз-Гол на многолетние колебания уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. №7, 1988. С. 87–97.

36. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. №6, 1994.

37. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Советское радио, 1977. 488 с.

38. Найдёнов В.П., Подсечин В.П. О нелинейном механизме колебаний уровня водоемов // Водные ресурсы. №6, 1992. С. 5–11
39. Найдёнов В.И., Кожевникова И.А. Предсказуем ли уровень моря? // Природа. №5, 1994. С. 4–11
40. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках. М.: Мир, 1986. 526 с.
41. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море. Экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 380 с.
42. Болгов М.В., Сенцова Н.И. Байесовские оценки расчётных характеристик минимального стока рек в нестационарных условиях // Метеорология и гидрология. №11, 2010. С. 70–80
43. Болгов М. В., Коробкина Е. А., Филиппова И. А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. №7, 2016. С. 72–81.

**Моделирование многолетних колебаний
уровней естественных озёр:
основные исследования ИВП РАН за 1967–2017 гг.**

А.В. Фролов

Введение

Многолетние колебания уровней крупных естественных водоёмов представляют собой традиционный предмет исследований специалистов Института водных проблем. Изучению различных аспектов уровня режима Каспийского моря, Байкала и других водоёмов уделялось и уделяется самое пристальное внимание. Естественные озёра являются замыкающими элементами речных систем, интегрирующими природные и техногенные воздействия на водные балансы и уровень режим этих водоёмов. Экономическая активность человека в бассейнах озёр, с одной стороны, влияет на гидрологический режим озёр, с другой стороны, существует и обратное влияние, особенно в прибрежной зоне. Исследованиям уровня режима озёр, выполненных и выполняемых в ИВП, свойственно сочетание научно-фундаментальной и прикладной направленности.

Среди озёр выделяются бессточные и проточные, в зависимости от отсутствия или наличия стока из водоёма. Иногда одно и то же озеро, в одно время, могло быть проточным, в другое время – бессточным, как, например, озеро Иссык-Куль и Каспийское море. Для многих бессточных озёр, расположенных в различных странах, общей и, возможно, главной, проблемой является угроза истощения водных запасов. В исследованиях российских (советских) специалистов особое внимание уделялось и уделяется самому большому внутреннему водоёму в мире – Каспийскому морю, учитывая его значение в социально-экономической активности в бассейне Каспия. Широкомасштабные планы развития орошения земель в бассейне Волги могли вызвать значительное снижение уровня Каспия. Насколько реальной была эта угроза – можно судить по судьбе Аральского моря, практически исчезнувшего вследствие разбора притока в море на орошение. Аналогичная угроза существует в наше время, например, для озера Урумие (Исламская республика Иран). Для Каспия природа оказалась милостивой – и уровень моря

поднялся до современных отметок даже и без реализации сомнительного проекта переброски части стока северных рек.

Проблема отрицательного техногенного воздействия на водный баланс и, как следствие, на режим колебаний уровня существует и для проточных озёр. Спрос на воду растёт непрерывно, и в настоящее время под угрозой оказался урочный режим Байкала и сток р. Ангары. Помимо негативного влияния непосредственных изъятий из речного притока в озера, изменения климата также могут привести к неблагоприятным изменениям в колебаниях уровней естественных водоёмов. Для решения возникающих проблем, связанных с урочным режимом озёр, необходимо, в первую очередь, понимать механизм и закономерности колебаний уровней водоёмов. Моделирование многолетних колебаний уровней озёр представляется необходимой составляющей исследований гидрологического режима естественных водоёмов.

Написать подробный обзор всех работ по исследованиям урочного режима озёр, выполненных в ИВП за полвека, учитывая ограниченный объём данной статьи, не представляется возможным. Здесь делается попытка представить наиболее значимые результаты в моделировании многолетних колебаний уровней озёр, полученные специалистами Института.

Основные виды моделирования многолетних колебаний уровней естественных озёр

В исследованиях многолетних колебаний гидрологических процессов применяются модели различных видов, допускающих различную классификацию в соответствии с их характерными особенностями. Можно выделить (с некоторой долей условности) два вида моделей – динамико-стохастические и чисто статистические.

Первый вид моделей – динамико-стохастические, учитывающие стохастическую природу моделируемого процесса и динамическую составляющую, формируемую соответствующим физическим механизмом. В Институте водных проблем приоритет был отдан именно этому виду моделей. Многолетние колебания уровней естественных водоёмов рассматриваются как выходной процесс динамической системы, на вход которой поступают стохастические входные процессы – основные составляющие водного баланса водоёма, реч-

ной приток, осадки и испарение. Динамика этой системы описывается уравнением водного баланса озера.

Несомненным достоинством динамико-стохастических моделей является их физическая обоснованность. При достаточно надёжном задании входных процессов и «внутренних» параметров моделируемой системы обычно это обстоятельство даёт достаточные основания считать смоделированный процесс адекватным реальному. В некоторых случаях оценка статистических характеристик колебаний уровня по смоделированному ряду может оказаться более надёжной, нежели при использовании ряда наблюдений. Например, колебания уровней бессточных озёр, обладают высоким коэффициентом автокорреляции, иногда превышающим 0,9. В сочетании с относительно небольшой длительностью наблюдений (обычно не более 100–150 лет), это приводит к тому, что ряды уровней оказываются эквивалентными всего нескольким независимым величинам, что не позволяет получить достаточно надёжных статистических характеристик уровня, необходимых для построения модели. Основные составляющие водного баланса озёр – речной приток, осадки, испарение – имеют существенно меньшую автокоррелированность, что позволяет получить более достоверные статистические характеристики этих процессов. При условии достаточно точного описания колебаний уровня озера уравнением водного баланса, надёжность оценок статистических характеристик колебаний уровня оказывается приемлемой, в отличие от прямых оценок по рядам наблюдений.

Другая причина для предпочтения динамико-стохастических моделирования колебаний уровней озёр перед чисто стохастическим моделированием – возможность получать оценку реакции уровней озёр на изменения составляющих водного баланса озёр. Такие изменения могут быть вызваны, в частности влиянием климата и прямым техногенным воздействием на водный баланс озёр – например, изъятиями из речного притока, изменением морфометрических характеристик озёр и прочими подобными причинами.

Ко второму виду относятся модели типа «чёрного ящика», т.е. устанавливающие структуру модели исключительно на основании статистических свойств моделируемого процесса, без явного учёта физического механизма, формирующего моделируемый процесс.

Такого рода модели колебаний уровней естественных озёр получили меньшее применение по сравнению с динамико-стохастическими, однако также рассматривались в работах специалистов ИВП.

Бессточные озёра

Впервые динамико-стохастическое моделирование было применено для описания колебаний уровня Каспийского моря как бессточного озера в конце 1930-х гг. С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем. Результаты их работы были доложены на Первом совещании по регулированию стока в 1940 г., организованного АН СССР. Публикация статьи [1] состоялась только после окончания Великой Отечественной войны, в 1946 г. В дальнейшем авторы неоднократно дополняли и развивали ранее разработанный подход [2–4]. Модель Крицкого и Менкеля описывала многолетние колебания приращений объёма воды в море, характеристики же уровня находились по зависимости между объёмом воды и уровнем воды в море. Основные положения, принятые авторами при моделировании, были следующие. В механизме формирования колебаний уровня моря выделялись два фактора: «активный», т.е. причина колебаний – изменчивость притока воды и испарения с акватории, и «реактивный», ограничивающий размах колебаний уровня, вследствие изменения объёма испарения – увеличения при отклонении уровня в большую сторону от равновесной отметки и уменьшения при снижении уровня. Под испарением, если не оговорено другое, в данном обзоре понимается разность между слоями испарения и осадков, называемая иногда «видимым», или «эффективным» испарением. На современном языке, активный фактор – это входной процесс системы «суммарный приток–озеро–уровень воды», реактивный фактор – суть отрицательная обратная связь в механизме колебаний уровня, образованная переменностью площади поверхности водоёма. Конечной целью моделирования было получение условных и безусловных статистических характеристик колебаний уровня водоёма. Оценки вероятностей отметок уровня находились в соответствии с принятым предположением о виде функции распределения вероятностей уровня. Крицкий и Менкель [1–4] предполагали, что годовые приращения наполнений Каспия и собственно колебания наполнений моря приближенно описываются распределением Гаусса – на основании того, отклонения уровня (соответственно,

наполнений) моря возможны как вверх, так и вниз от равновесного уровня. Отметим, что в работе [1] годовые объёмы притока в море и слоя испарения с морской акватории авторы также рассматривали как гауссовы случайные величины, причем некоррелированные между собой. Позднее, в статье [2], это условие гауссовости было несколько ослаблено, в том смысле, что гауссовым предполагались колебания «приведённых приращений», т.е. разности между объёмами притока и испарения с равновесной площади поверхности моря, без предположений о виде распределений притока и испарения по отдельности. Таким образом, Крицкий и Менкель при построении модели колебаний уровня Каспия использовали следующие предположения:

- о физическом механизме формирования колебаний уровня (наполнений), описываемым уравнением водного баланса водоёма;
- о функции распределения вероятностей входного процесса (разности между слоями притока в водоём и испарения);
- о временной структуре входного процесса – как последовательности независимых, или коррелированных последовательностей случайных величин;
- об отсутствии статистической связи между притоком в море и испарением;
- о зависимостях (линейных) между морфометрическими характеристиками водоёма – объёмами чаши, площади зеркала водоёма и уровня.

Разработанная Крицким и Менкелем модель колебаний уровня Каспия позволила получить основные статистические характеристики уровня моря: уровень тяготения (т.е. устойчивый равновесный уровень), дисперсию и автокорреляционную функцию, взаимные корреляционные функции уровень–приращение уровня и уровень–«приведённые приращения наполнения» (т.е. разность между слоями притока в море и испарения). На основе этой модели Крицкий и Менкель рассчитывали вероятности оттоков уровня моря на перспективу нескольких десятилетий [1–4].

Практическая значимость модели Крицкого и Менкеля вполне проявилась также в возможности оценки на её основе влияния на режим колебания уровня моря техногенных воздействий. Аналити-

ческие зависимости между характеристиками уровня, с одной стороны, характеристиками притока и испарения и морфометрическими параметрами, с другой, позволяют оценить реакцию колебаний уровня моря на такие виды техногенных воздействий, как изменений режима притока в море и морфометрических характеристик вследствие отделения части испаряющей поверхности моря. Например, отсечение мелководий приводит к повышению уровня тяготения моря и к увеличению размаха (дисперсии) колебаний уровня [1–4].

Модель колебаний уровня бессточного водоёма, разработанная Крицким и Менкелем, имела математическую форму дискретного (разностного) стохастического уравнения. Ими было впервые показано, что последовательность наполнений (уровней) замкнутого водоёма образует простую цепь Маркова при условии, что «приведённые приращения наполнений» (т.е. разности между слоями притока и испарения) суть последовательность независимых одинаково распределённых случайных величин. Если же «приведённые приращения» представляют собой простую цепь Маркова, то последовательность уровней в этом случае уже не будет марковской [2–4].

Для исследования уровня режима Каспийского моря, в дополнение к модели Крицкого и Менкеля, Д.Я. Ратковичем [4, 5] применялся имитационный метод моделирования, суть которого состоит в численном решении разностного уравнения водного баланса моря. Входные процессы – приток и испарение – задавались в виде взаимно некоррелированных последовательностей, выходной процесс – значения уровня моря – образует соответствующий ряд величин. Длина рядов входных процессов и уровня выбирается достаточно большой, чтобы обеспечить необходимую точность оценок статистических характеристик уровня. Имитационный метод исходит из тех же основных положений, что и аналитический метод Крицкого и Менкеля, но не требует линеаризации уравнения водного баланса водоёма, что представляется определенным его достоинством.

Проблема экстраполяции колебаний уровня Каспия рассматривалась в работах В.Е. Привальского [6, 7, 8]. Для экстраполяции уровня моря он использовал как чисто статистическую модель коле-

баний уровня [6], так и модели, основанные на использовании уравнения водного баланса водоёма [7, 8]. Для экстраполяции колебаний уровня моря использовались три вида параметрических моделей – авторегрессионной, скользящего среднего и смешанной. Были также проведены расчёты имитационным методом и по дискретному стохастическому уравнению водного баланса моря. Привальским были подтверждены выводы Крицкого и Менкеля [2] и М.И. Будыко и М.И. Юдина [9] о допустимости приближённого описания колебаний уровня Каспия процессом авторегрессии первого порядка (марковским процессом) и результат Н.А. Багрова [10] о большем соответствии колебаний уровня Каспия процессу авторегрессии второго порядка. По мнению С.Г. Добровольского [11], приращения уровня Каспия удовлетворительно описываются чисто статистической моделью процесса авторегрессии первого порядка. Результаты некоторых экстраполяций уровня Каспия, выполненных Привальским в предположении роста безвозвратных изъятий из речного притока (до 70 км³/год) указывали на значительное снижение уровня моря, чего, как известно, не произошло. Однако это не означает, что несовпадение экстраполяции и реального уровня было вызвано несовершенством модели колебаний уровня. Более того, при использовании любой, более или менее адекватной модели, любой – линейной или нелинейной, огромные изъятия в обязательном порядке должны были привести к прогнозированию значительного падения уровня Каспия. Было бы очень странно, если бы это было не так. Более подробно многие аспекты проблемы прогнозирования уровня Каспия приводятся в монографиях Ратковича [12, 13].

Значительному развитию теоретико-вероятностного подхода к исследованиям бессточных озёр послужила фундаментальная работа С.В. Музылёва [14,15]. Базисом для этой работы послужили положения теоретико-вероятностного подхода, разработанного Крицким и Менкелем. Применение Музылёвым математического аппарата непрерывных случайных процессов позволило свести проблему моделирования колебаний уровня бессточного озера к классическим задачам неравновесной статистической механики и статистической радиотехники.

Музылёвым было получено решение дифференциального (непрерывного по времени) стохастического уравнения, моделиру-

ющего колебания уровня бессточного озера, в приближении марковского процесса, плотность вероятности которого удовлетворяет уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова. Для вывода этого уравнения потребовалось применение метода расщепления усреднённого произведения двух случайных процессов (формула Фуруцу–Новикова), что позволило получить строгое математическое доказательство правомерности описания колебаний уровня бессточного озера линейным стохастическим дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Музылёв вывел уравнения для моментов распределения уровня произвольного порядка и получил большой набор статистических характеристик уровня: средний уровень озера как функцию средних величин и дисперсий составляющих водного баланса озера – притока и испарения, условная (зависящее от начальных условий) и безусловная дисперсии уровня, автокорреляционные функции уровня и его приращений, взаимную корреляционную функцию уровня и его приращений, взаимную корреляционную функцию притока в озеро и уровня, спектры уровня и его приращений. Применение теории выбросов случайных процессов показало, что среднее время перехода уровня через отметку уровня таяния равно примерно 30 годам. Близость функции распределения вероятностей уровня к нормальному распределению была объяснена эффектом нормализации процесса колебаний уровня как выхода линейной инерционной системы, у которой время корреляции входного процесса (разности между слоями притока и испарения) намного меньше времени корреляции уровня. Существенно, что Музылёвым были также получены статистические характеристики уровня для бессточного озера с притоком и испарением, имеющим симметричную (чётную) взаимно-корреляционную функцию [15]. Последний результат представляется практически важным, поскольку корреляции между притоком и испарением оказывает заметное влияние на размах колебаний уровня озера. По оценкам специалистов ГИ, коэффициент взаимной корреляции между притоком и испарением для Каспия равен примерно $-0,2 \dots -0,4$, что увеличивает дисперсию колебаний уровня моря примерно на 20%.

Исследования Музылёва, опиравшиеся на теоретико-вероятностный подход Крицкого и Менкеля, означали значительный про-

гресс в изучение многолетних колебаний уровней бессточных озёр и послужили фундаментом для моделирования ряда других гидрологических процессов – многолетних колебаний уровней проточных озёр, многолетних колебаний речного стока, в том числе озёрного питания.

Повышенный интерес в конце 1980-х – начале 1990-х гг. к проблеме моделирования уровня Каспия был связан, во-первых, с критикой не оправдавшихся прогнозов уровня моря, составлявших звено в обосновании переброски части стока северных рек на южный склон ЕТС. Во-вторых, значительные ущербы в экономике прибрежных территорий, вызванные подъёмом уровня Каспия на 2 м 40 см в 1978–95 гг., привели к необходимости разработки проектов по защите побережья от наступления моря, опирающихся на оценки будущих колебаний уровня. Были предложены модели, в основе которых использовалось предположение о нелинейной зависимости площади зеркала моря от уровня как причины существования нескольких равновесных уровней (см., например, [16]). Применительно к Каспию, гипотеза о нелинейной зависимости площади зеркала Каспия от уровня моря как о причине множественности равновесных уровней не получила подтверждения. Главным следствием критики существовавших моделей было стимулирование исследований в направлении поиска возможной положительной обратной связи колебаний в механизме колебаний уровня Каспия.

Именно это было сделано в исследованиях М.Г. Хубларяна и В.И. Найдёнова [17], предположивших формирование положительной обратной связи в механизме колебаний уровня моря вследствие тепловлагодобменных процессов взаимодействия водной поверхности с атмосферой. Собственно, соображения о зависимости испарения от уровня Каспия высказывались достаточно давно: «... средняя по водоёму [Каспию] в целом высота слоя видимого испарения [...] зависит, при прочих равных условиях, [...] от уровня моря» [4]. Более того, в качестве одной из задач дальнейших исследований авторами цитируемой монографии был прямо назван учёт «неравномерности испарения с различных частей акватории моря и зависимость интенсивности испарения от глубины, изменяющейся при колебаниях уровня» Каспия ([4], с. 131). Хубларяном и Найдёновым

были получены первые содержательные результаты моделирования, учитывающие этот эффект.

Гипотеза о зависимости испарения с поверхности моря от глубины (уровня) моря оказалась перспективной, вполне поддающейся физическому обоснованию. Для Каспия, в определённых условиях, эта гипотеза становилась обоснованным положением. Несколько упрощённо – но физически справедливо – можно сказать, что в основе модели Хубларяна и Найдёнова лежит хорошо известный и неопровержимый факт: вода на мелководье больше прогревается по сравнению с глубоководной частью водоёма, соответственно, испарение с мелководья будет больше. Экспериментально зависимость испарения с поверхности Каспия от уровня установлена Г. Н. Паниным [18]: в тёплый период (апрель–август) испарение с мелководного Северного Каспия намного больше испарения со Среднего и Южного Каспия, причём в отдельные месяцы – в разы. Например, в мае слой испарения с Северного Каспия в 2–3 раза больше, чем соответствующая величина для Среднего и Южного Каспия: 100, 35 и 42 мм/месяц соответственно [18]. Такое различие в испарении по акватории моря вполне понятно, если учесть, что средняя глубина Северного Каспия – 4,4 м, Среднего Каспия – 192 и 345 м, соответственно (по отношению к отметке уровня –28,0 м БС), при этом Северный Каспий занимает примерно $\frac{1}{4}$ площади всего моря. Такое сочетание мелководной и глубоководных частей Каспия уникально для крупных озёр.

Действие положительной обратной связи в механизме колебаний уровня бессточного Каспия, вызванной переменностью площади зеркала моря и зависимостью слоя испарения от глубины моря приводит к бимодальной функции распределения вероятностей уровня. Однако плотность распределения уровня Каспия становится одномодальной даже при небольших изменениях среднего притока в море от той его величины, при которой существует бимодальность. Анализ полученных в результате решения уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова плотностей распределения вероятностей уровня Каспия показал, что существование нескольких равновесных уровней моря («уровней тяготения») очень чувствительно к среднему притоку речной воды в море. Изменение среднегого-летнего притока даже на $1\text{--}3 \text{ км}^3$ может привести, например, к

тому, что, вместо трёх равновесных уровней останется только один [19]. Однако отсутствие свойства робастности модели Хубляряна и Найдёнова не уменьшает значения полученного ими вывода о существовании положительной обратной связи в механизме колебаний уровня Каспия, поскольку эта связь оказывает влияние на плотность распределения уровня моря в любом случае – даже если эта плотность имеет одномодальный вид.

Проточные озёра

Теоретико-вероятностный подход в изучении уровненного режима бессточного озера был естественным образом распространён на проточные озёра [20]. Такие озёра можно рассматривать как более общий тип озёр, нежели бессточные, поскольку в водном балансе добавляется сток из озера. Зависимость стока из озера от уровня воды в нём образует отрицательную обратную связь в механизме колебаний уровня водоёма. Для озёр, расположенных в зонах избыточного увлажнения, эта связь намного «сильнее», нежели отрицательная обратная связь, сформированная переменностью площади зеркала и испарением. Для проточных озёр, расположенных в зоне избыточного увлажнения, доля стока в расходной части водного баланса, примерно на порядок (в 10–13 раз) превышает расход воды на испарение. В таких случаях можно пренебрегать изменчивостью площади и считать её постоянной.

Зависимость между годовыми объёмами стока из озера от уровня в реальном диапазоне колебаний уровня обычно хорошо аппроксимируется линейной функцией. [20].

Каспийское море, по причине однонаправленного оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, также можно рассматривать как своеобразный проточный водоём. Однако, в отличие от проточных озёр зоны избыточного увлажнения, механизм колебаний уровня Каспия имеет особенности. Во-первых, отрицательные обратные связи – одна образованная переменностью площади зеркала (совместно с испарением), другая – зависимостью оттока в Кара-Богаз-Гол от уровня Каспия, имеют один порядок, хотя первая связь более выражена. Во-вторых, на колебания уровня в некотором диапазоне отметок положительная обратная связь, образованная нелинейной зависимостью испарения от уровня, оказывается более «сильной», нежели отрицательная, вызванная переменностью площади зеркала

ла моря. Как уже отмечалось, для бессточного Каспия, при отсечённом заливе Кара-Богаз-Гол и при некоторых величинах среднего притока, возможно существование бимодальной функции распределения вероятности [17].

Однако, как показали более детальные исследования, при проточном Каспии – т.е. при оттоке морской воды в залив Кара-Богаз-Гол – ситуация меняется. Отрицательная обратная связь, образуемая зависимостью оттока морской воды в залив, «подавляет» положительную обратную связь, вызванную нелинейной зависимостью объёма испарения от уровня Каспия. В результате, при свободном оттоке морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, функция распределения вероятностей уровня Каспия становится одномодальной [19,21]. Тем самым, было установлено, что проточность Каспия оказывает существенное влияние на вид плотности распределения вероятностей уровня моря.

Функция распределения вероятностей уровней проточных озёр зоны избыточного увлажнения зависит, главным образом, от функции распределения притока. Нормализации колебаний уровней проточных озёр не происходит, поскольку времена корреляции входных и выходных процессов мало различаются. В этом проявляется существенное отличие проточных озёр (Ладожское озеро, Байкал) от бессточных (Каспийского моря – без оттока в залив Кара-Богаз-Гол, Иссык-Куль, Балхаш).

Модель многолетних колебаний стока, вытекающей из озера, является следствием модели вариации уровня воды в водоёме в силу физической зависимости между этими процессами – стоком и уровнем. В естественных условиях, связь стока из озера от уровня воды удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией. Многолетние колебания стока озёрные реки описываются процессом авторегрессии второго порядка или же, в более общем случае, компонентой трёхкомпонентного марковского процесса [20, 22]. Для случая линейной зависимости между стоком из озера и уровнем получены аналитические зависимости между статистическими характеристиками входных процессов (суммарного поступления воды в водоём и испарения с зеркала водоёма) и соответствующими характеристиками стока озёрной реки.

Следует также отметить следующее обстоятельство, на которое обращал внимание В. Клемеш [23]. Уравнение водного баланса

естественного водоёма легко адаптируется для описания многолетних колебаний стока неозёрных рек. Тем самым, динамико-стохастические модели таких многолетних процессов, как вариации уровней бессточных и проточных озёр, стока озерных и неозёрных рек, эффективных (т.е. участвующих в формировании речного стока) запасов воды на водосборе оказываются различными формами наиболее общей модели – модели стохастического резервуара.

Прикладные аспекты динамико-стохастического моделирования многолетних колебаний уровней бессточных и проточных озёр

Результаты моделирования уровенного режима Каспия были использованы при научном обосновании Федеральной целевой программы «Каспий», в проектах по добычи углеводородов в прибрежно-шельфовой зоне моря и других прикладных задачах [19, 24]. Исследование возможности оптимального управления уровнем Каспия было выполнено М.С. Маркишем [25].

Усиление экономической активности в прибрежно-шельфовой зоне Каспия актуализировало задачу оценки характеристик возможных экономических ущербов, вызываемых многолетними колебаниями уровня моря. В первую очередь, для решения этой задачи требуются безусловные и условные математическое ожидание и дисперсия уровня моря, что в сочетании с детерминированными зависимостями величин ущербов от уровня моря позволяет оценить вероятностные характеристики [19].

Динамико-стохастические применяются при оценке изменения статистических характеристик уровенного режима Каспийского моря под влиянием техногенных и климатических изменений водного баланса моря [19, 26]. При решении этой – «прямой» – задачи полезным оказывается применение зависимостей между параметрами входных процессов, формирующих колебания уровня моря (речного притока и эффективного испарения), морфометрических и гидравлических параметров моря, с одной стороны, и статистическими характеристиками уровня – с другой. При исследовании задачи водоснабжения Калининской АЭС, коэффициенты асимметрии и автокорреляции стока озёрных рек озёрной системы Удомля–Песьво находились «применительно к гидрологическим элемен-

там уровня режима озёр, из которых реки берут свои начала» ([13], стр.202) по зависимостям, приведенным в [20].

Эти же зависимости применяются при решении некоторых т.н. «обратных» задач, когда по статистическим характеристикам **выходного** процесса (например, уровня воды в водоёме, или стока с водосбора) находятся соответствующие характеристики **входного** процесса (например, испарения).

Примеры решения обратной задачи – оценка статистических характеристик многолетнего испарения с акватории озера Байкал содержится в [22].

Одним из практически значимых результатов динамико-стохастического моделирования многолетних колебаний уровня озера Байкал был вывод о противоположном характере изменений дисперсий уровня озера и стока р. Ангары, вытекающей из озера. Было показано, что при уменьшении дисперсии колебаний уровня Байкала, как результата техногенного регулирования, происходит увеличение дисперсии колебаний стока р. Ангары. Тем самым, увеличивается вероятность экстремальных расходов р. Ангары, что создаёт угрозу нормальному функционированию социально-экономических объектов в бассейне этой реки [22].

Динамико-стохастические модели колебаний уровней применялись специалистами ИВП практически в исследованиях всех крупных естественных озёр на территории бывшего СССР. Так, объектами исследования, помимо упомянутых ранее водоёмов, были также Аральское море [27,28], озеро Иссык-Куль [29,30, 31], озеро Ханка [32], озеро Балхаш [33], озеро Сарыкамыш [34].

Задачи дальнейших исследований многолетних колебаний уровней естественных водоёмов

Актуальной задачей была и остаётся оценка реакции колебаний уровней озёр на климатические и прямые техногенные изменения водного баланса.

Для такой оценки необходимо, во-первых, разработать модели основных составляющих водного баланса озёр, отражающих влияние меняющегося климата, т.е. нестационарные модели составляющих водного баланса водоёмов.

Требует решения одна из важнейших и сложнейших задач – оценка техногенного влияния на водный баланс озёр на основе на

социально-экономического прогноза, практически всегда имеющего большую неопределенность. К сожалению, нет особых оснований полагать, что эту неопределенность можно уменьшить.

Отсюда следует необходимость рассмотрения различных вариантов водного баланса водоёма, и прогноз уровня режима в целом становится многовариантным из-за неопределенности, например, в оценках будущего техногенного уменьшения притока в водоём. Обоснование рекомендации для практического применения такого прогноза представляется отдельной задачей.

Колебания уровня проточного озера и стока реки, вытекающей из озера, обычно связаны между собой. В естественном режиме эта связь, как показывают данные наблюдений на многих водоёмах, практически функциональная, близкая к линейной. Превращение естественного проточного озера в водохранилище нарушает функциональную зависимость стока из озера от уровня воды в нем. Это нарушение вызывается искусственным регулированием стока из озера, например, направленным на удержание расходов воды в некотором диапазоне. Следствием этого регулирования стока из озера оказывается увеличение размаха колебаний уровня воды в озере, как это происходит на озере Байкал. Исследование совместного управления уровнем проточного озера и стоком озерной реки представляется практически значимой задачей дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Некоторые положения статистической теории колебаний уровней естественных водоёмов и их применение к исследованию режима Каспийского моря / Тр. Первого совещания по регулированию стока. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1946. С. 76–93.
2. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоёмов / Тр. Гидропроекта. Сб.12. Энергия, 1964. С. 29–61.
3. Крицкий С.Н. Методика анализа и расчёта колебаний уровня замкнутых водоёмов // Водные ресурсы. №6, 1973. С. 9–26.
4. Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 157 с.
5. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 256 с.
6. Привальский В.Е. Линейная экстраполяция колебаний уровня моря на основе параметрической модели // Физика атмосферы и океана. Т. IX, №9, 1973. С. 973–981.

7. Привальский В.Е. Оптимальная линейная экстраполяция колебаний уровня замкнутых водоёмов // Водные ресурсы. №5, 1973. С. 17–28.
8. Привальский В.Е. Климатическая изменчивость. М.: Наука, 1985. 203 с.
9. Будыко М.И., Юдин М.И. О колебаниях уровня непроточных озёр // Метеорология и гидрология. №8, 1960. С. 15–19.
10. Багров Н.А. О колебаниях уровня бессточных озёр // Метеорология и гидрология. №6, 1963. С. 41–46.
11. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера–атмосфера». М.: ГЕОС. 2002. 230 с.
12. Раткович Д.Я. Гидрологические основы водообеспечения. М.: ИВП РАН. 1993. 428 с.
13. Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения. М.: Наука, 2003. 352 с.
14. Музылёв С.В. Теоретико-вероятностный анализ колебаний уровней бессточных водоёмов // Водные ресурсы. №5, 1980. С. 21–40.
15. Музылёв С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука. 1982. 283 с.
16. Найдёнов В.И., Подсечин В.П. О нелинейном механизме колебаний уровня водоёма // Водные ресурсы. №6, 1992. С. 5–11.
17. Хубларян М.Г., Найдёнов В.И. О тепловом механизме колебаний уровня водоёмов // Докл. АН СССР. Т. 319, №6, 1991. С. 1438–1444.
18. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 86 с.
19. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: Геос, 2003. 170 с.
20. Фролов А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озёр. М.: Наука, 1985. 103 с.
21. Фролов А.В. Моделирование влияния оттока в залив Кара-Богаз-Гол на плотность распределения вероятности уровня Каспийского моря // Математическое моделирование и численные методы. №3 (11), 2016. С. 79–92
22. Фролов А.В., Выручалкина Т.Ю. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня озера Байкал и стока реки Ангары // Водные ресурсы. Т. 44, №3, 2017. С. 1–11.
23. Klemes V. Physically based stochastic hydrologic analysis / Advances in Hydroscience. V. 11, 1978. P. 285–356.
24. Голицын Г.С., Раткович Д.Я., Фортус М.И., Фролов А.В. О современном подъеме уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. Т. 25, №2, 1998. С. 133–139.
25. Маркиш М.С. Об оптимальном регулировании уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1982. С. 20–35.
26. Frolov A.V. The Caspian Sea as Stochastic Reservoir / Hydrological Models for Environmental Management. NATO Science Series 2. Environmental Security. Vol.2. Dordrecht/Boston/London. Kluwer Acad. Publishers. 2002. P. 91–108.

27. Коренистов Д.В., Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Шимельмиц И.Я. Проблема Аральского моря // Водные ресурсы. №1, 1972. С. 138–162.
28. Иванова Л.В. Гидрологические аспекты проблемы Аральского моря // Водные ресурсы. №2, 1992. С. 39–49.
29. Раткович Д.Я. Водный баланс и режим уровня озера Иссык-Куль // Водные ресурсы. №5, 1977. С. 20–33.
30. Гринёв М.А. Об управлении многолетним уровнем режимом оз. Иссык-Куль // Водные ресурсы. №1, 1992. С. 127–141.
31. Кулжабаев Ж. Об управлении режимом уровня озера Иссык-Куль // Водные ресурсы. №4, 1982. С. 41–47.
32. Баканов К.Г. Нелинейная вероятностная модель проточного озера // Методы построения и анализа моделей сложных природных систем. Владивосток, 1986. С. 114–129.
33. Раткович Д.Я., Иванова Л.В., Новикова Н.М., Фролов А.В. О проблеме озера Балхаш // Водные ресурсы. №3, 1990. С. 5–23.
34. Санин М.В., Алишеров Н.Б., Фролов А.В. Динамико-стохастическое моделирование процессов заполнения бессточных водоёмов // ДАН СССР. Т. 316, №6, 1991. С. 1472–1475.

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ, ПРОБЛЕМЫ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ

Экономические проблемы управления водными ресурсами и водным хозяйством

В.И. Данилов-Данильян

Управление изменяющейся либо нестационарной (это не синонимы!) системой существенно сложнее, чем системой неизменной, стационарной или хотя бы квазистационарной. Но ещё сложнее управление системой, которая должна измениться, но никак не меняется, во всяком случае – к лучшему. Здесь, естественно, имеется в виду управление как задача, которую следует решать исходя из общественного запроса, предъявляемого управляемой системе. В данной статье в качестве управляемой рассматривается система, включающая природно-ресурсную подсистему (водные ресурсы) и производственно-экономическую подсистему (водное хозяйство).

Неизбежно встаёт вопрос: какую задачу решает реальная система управления? Ту ли, которую необходимо решать в соответствии с требованием общества? Ответ на него давно известен при важном дополнительном условии: если отсутствует активный, свободный, действенный общественный контроль (в самых разнообразных формах – от избирательных и судебных институций до СМИ). При этом условии, т.е. при отсутствии или слабости общественного контроля, в каждой конкретной системе управления бюрократия подменяет поставленную обществом задачу совсем другой, а именно, преследует цель собственного сохранения, укрепления, расширения, создания благоприятных условий для коррупции и т.п. [1–3]. Однако что бы ни происходило в реальности, проблема рационального управления для удовлетворения социального запроса, общественной потребности не теряет не только теоретического интереса, но и сохраняет практическое значение: её анализ ярче высвечивает недостатки статус кво и указывает возможные направления его улучшения, тем самым отвечая – пусть даже не проявленной чётко, не осознанной в достаточной мере – другой потребности общества: понимать, что с ним происходит и куда надо двигаться. Далее рассматривается по

преимуществу экономический аспект этой проблемы, некоторые другие аспекты лишь затрагиваются – в той мере, в какой необходимо для экономического анализа.

Состояние объекта управления и управляющей системы

Состояние водных ресурсов (прежде всего, в отношении качества воды в источниках питьевого водоснабжения) в наиболее экономически развитых и плотнее заселённых регионах страны нельзя признать удовлетворительным. Материально-техническая база водного хозяйства уже в конце 1990-х гг. была морально устаревшей и физически изношенной и – за редкими исключениями – продолжает деградировать по сей день. Соответственно, неприемлемо часто фиксируются нарушения санитарно-гигиенических норм в воде, подаваемой через системы питьевого водоснабжения. В очень многих случаях совершенно недостаточны системы защиты от опасных гидрологических явлений (наводнения, размыв берегов, на которых расположены жилые дома, хозяйственные объекты, и пр.) – перечисление можно продолжать. Это – «физическая» сторона дела, внушающая обеспокоенность всем и каждому.

Система управления водными ресурсами и водным хозяйством явно не соответствует современному уровню, отставание России от развитых стран составляет здесь несколько десятилетий. Все управленческие цепочки, как известно, начинаются сбором информации. И уже первое звено – система мониторинга водных объектов – неудовлетворительно. Если уровни воды на водотоках худо-бедно измеряются, то мониторинг расходов воды подчас выглядит какой-то экзотикой. На Амуре более чем на ста створах измеряют уровни, в лучшем случае на трёх – расходы. Это предельный случай, но и в среднем ситуация неблагоприятная: не более четверти станций (или постов) дают информацию о расходах. Мониторинг качества воды поставлен ещё хуже. От регулярного взятия проб остались только воспоминания: там, где раньше брали три, а то и шесть проб в сутки, теперь нередко довольствуются одной в неделю – нет ни приборов, ни реактивов, ни персонала, ни денег. Мониторинг гидросистем (как и экосистем суши) спорадически проводят только научные организации. Регулярного мониторинга состояния дна, донных отложений нет, то же относится и к мониторингу водоохраных

зон¹. Единой системы мониторинга, куда должны поступать данные, собираемые различными ведомствами и организациями, не существует даже в проекте².

Каково качество информации, таковы и методы её обработки. Хотя научные исследования проблем управления водными ресурсами и водным хозяйством в России соответствуют (пусть даже не всегда и не во всём) мировому уровню, они почти не внедряются в практику. И дело не только в слабой информационной базе. Для использования современных методов управления (а это, прежде всего, информационные системы, компьютерные модели, интерактивные системы и пр.) необходимы квалифицированные кадры гидрологов и водохозяйственников – а их нет, и практически никто их теперь не готовит. А если нет квалифицированных кадров, то нет и спроса на разработки, использование которых невозможно без таких кадров. Круг замкнулся.

Неадекватность структуры существующей ныне в России системы управления водными ресурсами и водным хозяйством стоящим перед этой системой задачам давно стала притчей во языцех, но никаких изменений к лучшему не видно на протяжении многих лет. Нет органа исполнительной власти, который отвечал бы и за количество поставляемой потребителям воды, и за её качество, и за распределение этого количества при этом качестве; решал бы проблемы совместного использования водных ресурсов экономическими агентами, принципиально различающимися по типу водопользования; оптимизировал бы планы защитных мер от негативного воздействия водной стихии; целенаправленно занимался бы проблемой охраны вод; совершенствовал бы как экономические, так и административные методы управления в своей сфере; выступал бы от имени государства заказчиком на научно-исследовательские и проектные работы, на подготовку кадров, на конструирование и импорт оборудования и приборов, и пр., и пр. Без такого органа

¹ Между тем в Водном кодексе, действующем с 2006 г., ясно сказано: «Государственный мониторинг водных объектов состоит из: ... 2) мониторинга состояния дна и берегов водных объектов, а также состояния водоохранных зон» – гл. 4, ст. 30, п. 4 [4]

² В 1990-е гг. такая попытка была: в 1993 г. принято постановление Правительства РФ об организации Единой системы государственного экологического мониторинга (ЕГСЭМ), вот только среди многих министерств и ведомств, которым тогда была поручена эта работа, не нашлось ни одного такого, которое хотело бы её выполнять, – кроме, естественно, инициировавшего принятие этого постановления Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ

события развиваются по сценарию, именуемому «лебедь, рак да щука» (вполне подходит и другое название: «у семи нянек дитя без глаза»).

Неразбериха в структуре системы управления водными ресурсами и водным хозяйством имеет «прочное» юридическое основание: такая же неразбериха царит и в законодательстве. Пресловутый Водный кодекс РФ 2006 г. [4], несмотря на все последующие дополнения и изменения, не решает вопросов охраны водных ресурсов, экономики водопользования, распределения полномочий между уровнями и между органами государственной власти и т.д. Водный кодекс РФ 1995 г. [5] содержал хотя бы попытку ответить на некоторые из таких вопросов, пусть даже не всегда самую удачную. Когда было решено его заменить, два с лишним года специалисты рассматривали различные варианты, делали свои предложения, вносили поправки в законопроект, блуждавший между комитетами Государственной Думы, дискутировали с её депутатами на парламентских слушаниях и пр. Вдруг, как чёртик из табакерки, выскочил совсем другой, никакими специалистами не рассматривавшийся и нигде толком не обсуждавшийся совершенно новый текст, который и был принят Думой без промедлений во всех трёх чтениях. Авторы этого текста ни в какой мере не интересовали ни гидрология, ни экология, ни география... Заботили их по преимуществу права на владение, распоряжение и пользование объектами, да ещё глава о мониторинге (заимствованная из обсуждавшегося основного варианта) каким-то мистическим образом попала в принятый Думой в 2006 г. Водный кодекс.

Неудачная попытка заменить советскую систему стандартизации и нормирования техническим регулированием по западным образцам имела своим следствием то, что от понятия «стандарт» в сознании производителей и управляющих ими государственных чиновников остались лишь смутные воспоминания. Как в старинном китайском рассказе о юноше из Шоулина, который захотел ходить так, как ходят в Ганьдане, и отправился туда учиться, но из этого ничего не вышло, более того, юноша забыл, как ходят в Шоулине, и вернулся домой ползком³.

³ Этот рассказ вспоминает Акутагава Рюносэ – см. [6, с. 386]

Особенности российской системы управления водными ресурсами и водным хозяйством заслуживают гораздо более подробного обсуждения, чем возможно в данной статье. Отметим лишь, что они присущи не только данной отрасли, они характерны для всей системы государственного управления в России. Специфичны лишь конкретные проявления, причём специфичность определяется физическими и прочими свойствами объекта управления, «внешними» по отношению к системе управления факторами. Впору говорить о некоем коллективном бессознательном (примерно по К.Г. Юнгу [7]), присущем контингенту занятых в этой системе. Если соответствующего компонента в психике у человека нет, он не задержится в этом контингенте, даже если в него случайно попадёт, – какими бы талантами и умениями он ни обладал. Однако оставим социальным психологам задачу выявить основные архетипы, определяющие этот феномен.

Состояние водоохраных зон, как правило, способно внушить ужас. Тут не действуют никакие механизмы – ни экономические, ни административные, ни юридические. Казалось бы, надо просто власть употребить, но что делать, если в данном случае как раз этого власть и не хочет? В случае экономических механизмов (как и административных и судебных) человеческий фактор действует вполне аналогично его роли в функционировании сложных технических устройств, только значение уже упомянутого коллективного бессознательного в управлении государством и экономикой несравненно важнее, чем техническими системами, и последствия ошибок гораздо масштабнее и серьёзнее.

Экономический механизм водопользования и охраны вод похож на старый грузовик, который по полному бездорожью тащит непомерный груз, и на каждом ухабе какая-то часть груза вываливается из машины. Груза всё меньше, зато ухабы всё глубже. Самый кричащий недостаток – тарифы на водоснабжение, при которых большинство (едва ли не подавляющее) водохозяйственных организаций, т.е. водоканалов, не могут свести концы с концами. Уму непостижимо, как может существовать экономика, в которой организации, абсолютно необходимые обществу, десятилетиями влачат такое существование. Естественно, никакое законодательство ничего не

сообщает о том, что делать, если умереть – с позиций общества, государства – нельзя, а жить в этой реальности невозможно.

Плата за водопользование держится на столь же «безупречных» базовых ставках – подстать тарифам. Одни за воду не платят вообще (орошаемое земледелие, например), другие находятся примерно в той же ситуации, что водоканалы. Скажем, АЭС «Полярные зори» (Мурманская область) с прямоточной системой водоснабжения, включённой, кстати, в реестр наилучших доступных технологий, этими платежами доведена почти до разорения, а перейти к оборотной системе не может – климатические условия не позволяют. Ставки платежей за негативное воздействие на водные объекты никогда, ни при каких темпах инфляции адекватно не индексировались. Поскольку они с самого начала, т.е. с 1992 г., были сильно занижены (дабы окончательно не загубить дышавшие на ладан предприятия), то практически всегда выполняли и выполняют только фискальную, но не регулирующую функцию. Далеко не все из вполне наблюдаемых, измеряемых типов негативных воздействий на окружающую среду, в том числе и водную, охвачены этими платежами.

Экологические фонды, существовавшие с 1992 г., и водные фонды⁴, организованные в 1996 г., были ликвидированы в 2000 г. в ходе очень неуклюжей бюджетной реформы. Надоело объяснять, зачем эти фонды нужны, почему их ликвидация была ошибкой и пр., надоело слушать обещания и объявления о намерении восстановить их. Сколько можно толочь воду в ступе?

О сложности управления водными ресурсами и водным хозяйством

Весьма серьёзные объективные причины сложности задач управления водными ресурсами и водным хозяйством многократно назывались и изучались. Попробуем посмотреть на их совокупность.

1. Монопольность рынка со стороны поставщика воды и большинства видов услуг водного хозяйства, причём монополия естественная, никакими антимонопольными мерами неустраняемая. Следствием этого служит отсутствие рыночных цен, более того –

⁴ Теперь Водным фондом называется совсем другое, а именно, совокупность водных объектов в пределах территории РФ, включенных или подлежащих включению в государственный водный кадастр, – по аналогии с Лесным фондом и Земельным фондом

каких бы то ни было рыночных ориентиров. Эта ситуация ещё более усугубляется обстоятельствами, указанными в следующем пункте.

2. Жёсткие социальные ограничения. Именно они – причина неадекватно низких тарифов на воду в российском ЖКХ, бесплатности воды для орошения и пр. От этих ограничений никуда не уйти, но они должны совсем иначе, чем сейчас, трансформироваться в элементы финансово-экономического механизма в целом (а не в его отраслевую, т.е. водную, часть).

3. Как никакой другой объект государственного управления, водные ресурсы и водное хозяйство отличаются высокой неопределённостью входной информации (и, как следствие, параметров управления) – по количеству, качеству, режиму, потребностям и спросу на воду и услуги обеспечения водопользования. Все проблемы гидрометеорологического прогнозирования переносятся в управление водными ресурсами и водным хозяйством, но при этом обуславливаемая ими сложность управления усиливается социально-экономической неопределённостью, в какой-то своей части коррелирующей с «гидрометеорологией», но помимо этого имеющей множество причин, ни с погодой, ни с водой, ни с климатом никак не связанных. Эта многосторонняя, многофакторная неопределённость – вовсе не такое отсутствие детерминизма, когда вместо детерминистских зависимостей приходится прибегать к теоретико-вероятностным описаниям с известными статистическими характеристиками. «Водная» неопределённость, увы, не обладает свойствами, при которых возможны адекватные статистические описания, проверка статистических гипотез даёт положительные результаты и т.п. При такой неопределённости использование, например, математических моделей оптимизации возможно только в интерактивном режиме, с набором сценариев возможного развития событий [8].

4. Вода как потребительская ценность характеризуется не только количеством, но и качеством. Ничего особенного в этом ещё нет. Специфика воды проявляется в зависимости качества воды в источнике от её количества, забираемого из этого источника: чем больше отбор воды, тем ниже её качество. При этом соответствующая зависимость, конечно же, неопределённая (в отличие, например, от ситуации в горном деле, когда заранее достаточно хорошо известно, как будет изменяться концентрация полезного компонента в извлекае-

мой горной массе, т.е. её качество, по мере обработки месторождения).

5. Водное хозяйство – единственная отрасль, одновременно и ресурсная (производственная, поставляющая другим отраслям необходимое им сырьё – воду), и инфраструктурная (т.е. создающая условия, требуемые для их деятельности). Производственные и инфраструктурные отрасли недаром разделены в экономической науке – они различаются не только по функции в народном хозяйстве, но и по способам их описания и анализа, характеристикам деятельности, методам учёта, прогнозирования и планирования.

6. Водные ресурсы – единственный вид ресурсов, для которых характерны принципиально различные типы пользования, принципиально многоцелевое использование: жилищно-коммунальное хозяйство, промышленность и сельское хозяйство используют воду, извлечённую из источников, их требования касаются количества и качества воды; гидроэнергетика использует потенциальную (гравитационную) энергию воды, пропуская её через турбины гидроэлектростанций; водный транспорт использует водные пути по водотокам и водоёмам и предъявляет требования к глубинам; лесосплав использует водотоки как водные пути и интересуется скоростями течения и геометрией русла; рыболовство более всего беспокоится состоянием водных экосистем, а в случае гидростроительства ещё и рыбопропускными сооружениями, эффект которых, впрочем, оказался куда меньшим, чем когда-то ожидалось; рыбоводству нужна вода достаточно высокого качества; рекреационная отрасль заинтересована не только в качестве воды, но и в состоянии прибрежных экосистем, которое всегда тесно коррелирует с состоянием водного объекта. Особый вид водопользования – сброс сточных вод; он неизбежен у всех водопотребителей, производится (или происходит) различными способами и с различными относительными потерями на так называемое безвозвратное водопотребление. Различия отраслей-водопользователей в зависимости от роли, которую играют вода и водные объекты в их функционировании, хорошо известны. Это обстоятельство вносит радикальное осложнение в задачи планирования и регулирования водохозяйственной деятельности (точнее было бы сказать: водохозяйственных деятельностей). Согла-

сование интересов водопользователей различных типов приводит к задачам управления, не воспроизводимым в других отраслях.

7. Необходимо, наконец, подчеркнуть совершенно особую экологическую роль воды, водной среды, водных объектов. Вода – главный экосистемообразующий фактор в биосфере, и её возможность выполнять эту функцию оказалась чрезвычайно зависящей от водопользования, его объёмов и способов реализации [9], т.е. технологий, а также и множества других факторов, не входящих в сферу водного хозяйства, но безусловно относящихся к охране вод, т.е. таких, которые должны быть включены в компетенцию управления водными ресурсами. Отсюда проистекают многие проблемы, неведомые системам управления другими отраслями, и ещё более возрастает неопределённость исходной информации.

Приведённый здесь далеко не полный обзор причин, в силу которых проблема управления водными ресурсами и водным хозяйством оценивается как весьма сложная, возможно, даёт представление об уровне этой сложности. В неё вплетены не только все задачи, которыми занимаются микроэкономика, теория управления отраслями экономики, теория фирмы (на этих задачах в силу очевидной потребности в их применении в рассматриваемой здесь сфере внимание не фиксировалось), но и ряд нетипичных или плохо разработанных задач и, главное, сугубо специфичные для водной отрасли, практически не затронутые экономической наукой вопросы. В совокупности они составляют такую проблему, подходов к комплексному, целостному решению которой современная экономическая теория не имеет. Да и вряд ли возможно подобное решение, для этого проблема слишком богата, разнопланова и, возможно, даже внутренне противоречива. Тем более интересно проанализировать возможности применения к проблемам управления водными ресурсами и водным хозяйством аналитического аппарата экономической теории, хотя бы некоторых разработанных в ней понятий, отделить реальные перспективы от иллюзий.

Водная рента

Проблематика водной ренты, по-видимому, слишком сложна, так что экономическая наука её предпочитает не заниматься. Вот последняя монография, посвящённая проблеме ренты [10]; о ренте

сказано много, в том числе и полезного, но только не о водной, самих слов «вода», «водная», «водный» в тексте не найти. В другой не так давно вышедшей книге [11] чего только нет: и рента, и квазирента, и антирента... Только о водной ренте – ни слова; и здесь соответствующие слова просто отсутствуют. Между тем природной ренте посвящена целая глава, в ней три параграфа – о земельной, горной и лесной ренте. Книга [12] имеет многообещающее название: «Рентные отношения водопользования в России», но, увы, хотя определение водной ренты на с. 49 дано, но совсем не выявлена её специфика; рентными отношениями автор, по-видимому, называет любые связанные с водой платежи, приводит статистические данные о них, рассматривает регулирующие их законодательные и нормативные акты и т.п.; какое отношение всё это имеет к собственно водной ренте, из книги понять нельзя. Конечно, применение, например, теоремы Куна–Таккера к неким модельным построениям – очень увлекательное занятие, но дело-то ведь в том, что условия Куна–Таккера не выполнены ни для одной похожей на реальность водноресурсной или водохозяйственной модели.

О ренте можно рассуждать применительно к любому фактору (ресурсу) производства. Рентой, доставляемой фактором производства, в экономической теории называют обусловленную использованием этого фактора долю прибыли, получаемой данным производством (в принципе, можно вместе прибыли взять и другие стоимостные

характеристики результата производства; прибыль – наиболее распространённый, чаще используемый, относительно просто калькулируемый и понятный показатель). Соответственно, природная рента – доля прибыли, обусловленная использованием природного ресурса (например водного), «вклад» ресурса в прибыль. В каждом конкретном случае, прежде всего, следует договориться, что понимается под производством и что – под ресурсом.

Первичная производственная ячейка – предприятие, для него можно считать вполне понятным, что такое его прибыль (естественно, за конкретный период, при анализе ренты это всегда год) и какие ресурсы (факторы производства) оно использует. Следующие уровни – совокупности предприятий: всех, эксплуатирующих некий общий ресурс; всех, расположенных в одном районе (географичес-

ком или административном); всех, расположенных в одном государстве, и т.п.

Обычно нет проблем и с определением природного ресурса, если это земля, лес или минеральный ресурс. В первом случае это – участок земли, достаточно однородный, одноцелевого использования. Если в качестве земельного ресурса фигурирует более сложный земельный объект, то его всегда можно разделить на относительно однородные участки одноцелевого использования и рассматривать объект как их совокупность. В рыночной экономике у таких участков есть очень важное качество: известна их рыночная цена. Земельные участки продаются на рынке, причём представляют собой (как правило) массовый товар, так что их рыночные цены обладают, как предполагается, теми свойствами, из-за которых определяющий их рынок обожествляется почти всеми экономическими школами. Похожая ситуация с лесными ресурсами; то обстоятельство, что лесные участки чаще не продаются, а сдаются в аренду, не служит осложнением: арендная плата – один из частных случаев рыночной цены. В случае минеральных ресурсов природный объект определяется вполне однозначно – месторождение, но рыночной цены он не имеет: месторождения не продаются на рынке, а даже если продаются, не являются массовым товаром в силу их уникальности (геологи говорят: двух одинаковых месторождений не бывает). Железная руда, уголь или нефть – не ресурсы, а продукты, получаемые в результате эксплуатации минеральных ресурсов – месторождений.

С водными ресурсами – сплошные неприятности. Нет однозначности даже в определении природного объекта – носителя или источника ресурса, т.е. водного объекта. Дефиниция, приведённая в Водном кодексе РФ (гл. 1, ст. 1, п. 4): «водный объект – природный или искусственный водоём, водоток либо иной объект, постоянное или временное сосредоточение вод в котором имеет характерные формы и признаки водного режима» [4], – представляет собой замаскированную тавтологию (её общая формула: А есть то, что обладает свойствами А). Вот Конаковская теплоэлектростанция использует воду Волги. Если требуется определить водную ренту, производимую этой ТЭС, то какой объект надо рассматривать как природный ресурс: Волгу, Ивановское водохранилище, на берегу которого стоит электростанция, водохозяйственный участок? Легко привести

аргументы в пользу каждого из этих вариантов, и той однозначности, которая имеет место в случаях земельных, лесных и минеральных ресурсов, очевидно, нет. Едва ли не всегда принимается грубое упрощение задачи: под водной рентой понимают только ту её часть, которая производится при водопотреблении, т.е. вследствие забора воды (аналогично, впрочем, поступают и в случае лесных ресурсов: поскольку из всех полезностей леса на аукционных торгах в расчёт принимается только древесина, при оценке лесной ренты в расчёт берут только объём древесины). Но упрощение состоит не только в игнорировании типичного случая, когда водный ресурс используется и для других, помимо водопотребления, целей: каждый водопотребитель осуществляет и сброс воды, и если качество сточных вод ниже, чем воды в объекте-приёмнике, то и на операции сброса заведомо имеет место эффект образования водной ренты (это – лишь простейшая из ситуаций, которые следовало бы рассмотреть в связи с задачей выявления водной ренты при сбросе сточных вод).

Если рассмотреть водопользователей различных типов, окажется, что и природные объекты, от которых зависят результаты их деятельности, разные: ЖКХ и рыболовов может интересовать вся река, гидроэнергетиков – её участок от истока до плотины, транспортников – только судоходный участок. Кого-то всё это, может быть, и не смущает, поскольку можно рассуждать так: рассмотрим все предприятия, использующие водные ресурсы, например, Волги, определим для каждого из них вклад этих ресурсов в его прибыль, сложим все результаты и получим водную ренту для всей Волги. Однако уже первый шаг этой процедуры корректно реализовать не удастся.

В самом деле, если производство использует различные факторы (ресурсы) и каждый из них имеет рыночную цену, так что можно вычислить затраты каждого из них на получение результата производства, то совершенно естественно полагать, что вклад каждого ресурса в этот результат пропорционален его затратам (технические трудности, обуславливаемые, например, разновременностью затрат и т.п., относительно легко преодолимы). Но если у чего-либо нет рыночной цены, то нет и никакой основы для определения его ценности (стоимости), рынок – единственный источник объективной информации о цене, ценности, стоимости. От того, каков рынок (сво-

бодный с совершенной конкуренцией, монополистический, монополистический, массовый, сингулярный и т.д.), зависят свойства определяемых им цен, но существование цен определяется существованием рынка или хотя бы предположением о некоем гипотетическом рынке. Если в экономическом тексте говорится о том, что рыночная цена какого-либо товара «неправильная» (завышенная или заниженная, неравновесная, неоптимальная и т.п.), то за этим всегда стоит сравнение определившего её реального рынка с неким гипотетическим рынком, иначе текст – не экономический (поэтический, мистический, юмористический и пр.). После неудачных попыток заменить деньги «трудовыми талонами», а в качестве цен использовать затраты труда, советская система ценообразования перешла к элементарной, бесхитростной имитации рынка, разумеется, с очень тяжёлым прессом волюнтаризма руководителей, осложнённого невежеством большинства исполнителей. Рынок близорук, он порождает силы, разрушающие его самого или даже общество, где он господствует, его господство приводит к так называемым «провалам» (внешним эффектам, экстерналиям) и т.д., и т.п., но другого источника цен и, тем самым, информации для определения ценности, стоимости нет и не предвидится. Сами понятия цены, ценности, стоимости порождены обменом, рынком и без привязки к нему вряд ли сохранят какой-нибудь смысл. (Для тех, кто надеется с помощью трудовой теории стоимости в конце концов обойтись без рынка, заметим, что разные виды труда иначе как посредством рынка сопоставить не удастся. Рынок не будет нужен только такому обществу, которое в принципе не нуждается в подобных сопоставлениях и соизмерениях).

Имеет ли решение предельно упрощённая задача, когда водная рента исчисляется не для всех водопользователей, а только для водопотребителей (т.е. забирающих воду из природного объекта), и понимается под ней вклад не водного ресурса, а только забранной воды в экономический результат деятельности водопотребителя? Повернёмся лицом к реальности и вспомним, что никаких рыночных цен, удовлетворяющих хотя бы минимальным требованиям экономической теории, на водные ресурсы не существует. Единственный предлагаемый способ обойти эту трудность состоит в том, чтобы принять за водную ренту разность между прибылью (или её

частью) и общими затратами всех остальных факторов производства. Пусть в годовом исчислении D – прибыль, a_i – затраты фактора i , $i=0, 1, \dots, n$ (водный ресурс в число этих факторов не входит), r – водная рента, C – общие затраты. Тогда $r = D - \sum_{i=1}^n a_i$; $C = r + \sum_{i=1}^n a_i$ и, очевидно, $D=C$. Но если прибыль равна затратам, то рента для каждого фактора производства, в том числе и водного ресурса, равна нулю: $r=0$. Чтобы избежать этого нелепого вывода (хотя он почти не искажает реальность для большинства российских водоканалов), предлагают в формуле для водной ренты брать не самую чистую прибыль, а уменьшать её на среднюю норму прибыли k ($0 < k < 1$): $r = (1-k) D - \sum_{i=1}^n a_i$. В модельной экономике это предложение выглядит вполне убедительно. Но средняя норма прибыли – экономическая абстракция, «средняя температура в больнице». Вопрос о ней по сути тот же, что и о едином нормативе экономической эффективности, десятилетиями дискутировавшийся советскими экономистами. В каждой отрасли «своя» средняя норма прибыли, как и «свой» норматив эффективности, причём ни то, ни другое в наши дни ни для каких отраслей толком не известно. И это не случайно: для рынка прибыль, может быть, и единственный критерий, но дальновидный предприниматель руководствуется и другими критериями (устойчивость, желательность или, наоборот, опасность экспансии, то же относительно конкурентной тактики – агрессивной или миролюбивой, и пр.), которые влияют на краткосрочную (годовую) прибыль, причём всегда в сторону её уменьшения; значимость этих других критериев с годами только возрастает.

Таким образом, даже при предельных упрощениях, игнорирующих многообразие типов водопользования и иные отмеченные ранее особенности водных ресурсов, убедительного решения задачи об исчислении водной ренты не видно. Однако это обстоятельство, безусловно, досадное с теоретической точки зрения, не вносит особых осложнений в задачи управления водными ресурсами и водным хозяйством. Ради каких целей регулярно поднимается вопрос о природной, в том числе водной ренте? Прежде всего, ради того чтобы «отобрать» природную ренту у тех, кто, не будучи владельцем природных ресурсов (они согласно Конституции РФ являются, главным образом, общенародной собственностью), эксплуатирует их и присваивает её себе. Но в процессе перераспределения при-

родной ренты задействованы многие налоги и сборы (налоги на прибыль, на добавленную стоимость, на добычу полезных ископаемых, подоходный, на имущество, а также пошлины и пр.), и при надлежащей настройке их параметров они способны вполне успешно справиться с задачей «отбора» природной ренты [13]. Такая настройка, конечно, требует экономического анализа с учётом социальных факторов, расчётов, в том числе и по экономико-математическим моделям, и т.п. Но ещё важнее обратная связь налоговой системы с социально-экономической реальностью, позволяющая своевременно корректировать эти параметры при обнаружении неизбежных несоответствий между приближёнными расчётами и непрерывно изменяющейся реальностью (с расчётами многих ставок налогов и сборов и других параметров дело обстоит немногим лучше, чем с водной рентой). Отметим, что идея полностью отбирать у производителей ренту за использование факторов, которые являются собственностью государства, сама по себе порочна: она лишает предпринимателя стимула искать лучшие условия производства и лучшие сочетания производственных факторов [13].

Стоимостная оценка водных ресурсов

Задача стоимостной оценки природных ресурсов с давних пор рассматривалась при попытках исчислить такие макроэкономические показатели как национальное богатство и пр. Новый смысл она приобрела в связи критикой показателя валового внутреннего продукта как не отражающего экологические издержки и истощение природных ресурсов. Для расчёта скорректированных чистых накоплений (*adjusted net savings*)⁵ – наиболее известного из показателей, лишённых этого весьма существенного недостатка – требуется не оценка «валовых» природных ресурсов, а лишь её изменение по итогам года, т.е. оценка затраченных невозпроизводимых ресурсов и некомпенсируемые естественным возобновлением потери воспроизводимых ресурсов. Такую оценку можно получить с большей точностью, чем оценку «валовых» природных ресурсов, тем не менее ООН приняла решение рекомендовать всем странам рассчитывать именно валовые оценки. ООНовских статистиков, озабоченных, главным образом, международными сопоставлениями, прежде всего интере-

⁵ Определения и методы расчёта эколого-экономических макропоказателей см. в [14]

суют минеральные ресурсы, в меньшей степени – лес и ещё в меньшей – водные и недревесные биологические ресурсы. Методологические трудности стоимостной оценки водных ресурсов, по-видимому, либо не были приняты во внимание при выдаче рекомендаций, либо сознательно проигнорированы, чтобы не утратить «полноты картины», хотя такая полнота – не более чем иллюзия⁶. Главные из этих проблем – те же, что и при расчёте водной ренты. Первопричина трудностей отсутствие ценовых рыночных ориентиров на водные ресурсы, осложняющие факторы разнообразны, но основной среди них – многоцелевое использование водных ресурсов, принципиально различные типы водопользования. Хотя возможна и инверсия этих причин: отсутствие рыночных ориентиров можно аргументировать имманентной «нерыночностью» водных ресурсов, объяснять их «неторгуемость» запутанными отношениями между водопользователями различных типов, совместимых в своей водоэксплуатационной деятельности и, вместе в тем, остро конкурирующих за водные ресурсы (имеется в виду не обычная конкуренция за воду, характерная для водопотребителей в условиях дефицита воды, а споры о режимах пользования, как это происходит между гидроэнергетикой, с одной стороны, и гидромелиорацией, водным транспортом, рыболовством – с другой).

Проблема чувствительности результата экономических расчётов к точности исходных данных часто недооценивается. Ещё 30 лет тому назад в [16] на основе анализа официальной советской статистики было показано, что при характерной для неё точности данных приведённые затраты для одного и того же объекта имеют интервал разброса практически такой же величины, как и сами оцениваемые приведённые затраты. Следовательно, совершенно бессмысленно сопоставлять конкурирующие проекты по этому показателю – в таком интервале обычно уместаются значения приведённых затрат для всех таких проектов. Трудно ожидать, что при той точности данных, которые должны использоваться для стоимостной оценки водных ресурсов, и при отсутствии исходной информации для каких бы то ни было оценок по ряду аспектов водопользования разброс результата в данном случае будет меньше, чем при калькуляции

⁶ Впрочем, неполнота информации не смущает ООНовских статистиков. Например: «В случае, когда данные отсутствуют, скорректированные чистые сбережения не включают ущерба от выбросов твердых частиц» [15]

приведённых затрат. Вряд ли работа по калькуляции этой оценки, инициированная ООН, даст результаты, которые будут представлять какую-либо теоретическую или практическую ценность. Конечно, они будут использоваться средствами массовой информации: для современного обывателя характерно слепое доверие к сообщениям, начинающимся словами «По данным ООН...» и т.п., но и в этом направлении кроме пустого шума никаких результатов ожидать не следует.

Платежи и фонды

Связанные с водными ресурсами и водопользованием платежи в бюджет (неважно, как они называются: налогами, сборами, фиксированными платежами и т.п.) подразделяются на два типа: экологические, т.е. определяемые негативным воздействием на водные объекты и зависящие от объёма и степени опасности воздействия, и пользовательские (название условное), т.е. определяемые использованием водных ресурсов в любых целях, не только для получения прибыли.

Экологические платежи реализуют принцип «загрязнитель – платит», принятый мировым сообществом после Конференции ООН по окружающей среде (Стокгольм, 1972). Идея подобных платежей была предложена ещё в начале 20 в. английским экономистом А.С. Пигу [17]. Эти платежи он называл корректирующим налогом и полагал, что они могут «сгладить» внешние эффекты (провалы рынка), т.е. такие косвенные последствия деятельности экономических агентов, которые не регулируются рынком, но наносят ущерб другим экономическим агентам (типичный пример – сброс загрязнённых стоков в реку, который обуславливает ущерб водопотребителям, рыбному хозяйству, гостиничному бизнесу и пр.). Такой налог Пигу рассматривал как средство интернализации внешнего эффекта, т.е. вовлечения в рыночную систему оценивания фактора, который ранее рынком как бы не замечался⁷. Возможны различные формы реализации экологических платежей.

В России экологические платежи были законодательно введены в 1992 г. для трёх видов загрязнений: выбросов в атмосферу, сброс в

⁷ Экономисты ультралиберальной ориентации активно критикуют подход Пигу, основываясь на так называемой теореме Коуза – утверждении, весьма далёком от экономических реалий (см. об этом [18])

водные объекты, размещение твёрдых отходов. Система использовала принцип предельно допустимых концентраций (ПДК) в обоих его предназначениях – для характеристики уровня загрязнения природных объектов и воздействий на них. Все загрязняющие вещества были распределены по классам опасности (в соответствии с ПДК для водных объектов), и для тонны загрязнения из каждого класса определена базовая ставка. Платёж по конкретному загрязняющему веществу для источника его сброса в водный объект зависел от объёма сброса и трёх параметров: базовой ставки, предельно допустимого сброса (ПДС, общее название – предельно допустимое воздействие, ПДВ)) и временно согласованного сброса (ВСС) (общее название – временно согласованное воздействие, ВСВ). Для объёма сброса не выше ПДС применялась базовая ставка, для сброса из интервала от ПДС до ПСС она умножалась на 5, для превышающего ПСС – на 25 (аналогично для выбросов в атмосферу и размещения твёрдых отходов). Такая система действовала в течение 1990-х гг. и с несущественными изменениями работает до сих пор, но в 2014 г. принято законодательное решение о её замене системой, основанной на принципе наилучшей доступной технологии (НДТ).

ВСВ назначались исходя из экономических или социальных мотивов – в случае, если технология предприятия-загрязнителя не позволяла снизить воздействие на окружающую среду при работе в штатном режиме до уровня ПДВ, средств на замену технологий у предприятия заведомо не было, а его закрытие было недопустимо по упомянутым мотивам. 25-кратные ставки фактически применялись только для загрязнений, произошедших вследствие нарушений штатного режима по вине персонала. В принципе допускалась дифференциация параметров по регионам исходя из экологических соображений. Слабые места этой системы очевидны. Прежде всего, критике подвергается использование ПДК в силу недостаточной точности, более того – достоверности этих показателей; произвола вместо научного обоснования в процедурах их определения более чем достаточно. Очень ненадёжны, слабо обоснованы процедуры расчёта ПДВ. Эти слабые места – следствие попытки определять платежи за негативное воздействие на природу, взяв за отправную точку природные системы, их реальное состояние, их реакцию

на воздействия. Но природные системы слишком сложно устроены, отсюда все грехи рассматриваемого подхода.

Технические системы устроены несопоставимо проще, чем природные, именно это стоит за намерением заменить принцип ПДК на принцип НДТ при определении платежей за негативное воздействие на окружающую среду и, в частности, на водные объекты. Не от природы с её «требованиями» к предприятию, а от предприятия с доступными ему возможностями – к природе. Это радикальное изменение точки зрения вполне можно считать антиэкологичным, но, в конце концов, дело не столько в идее, сколько в её реализации. Принцип НДТ состоит в том, что загрязнитель платит за загрязнение только в том случае, если его уровень превышает тот, который обеспечивается наилучшей из доступных ему технологий того же назначения. Справочники и реестры НДТ с их экологическими характеристиками становятся главной частью информационной базы определения экологических платежей. Неясностей и неоднозначностей и здесь хватает, может быть, не меньше, чем в предыдущем случае. Невозможно точно определить, что такое доступная технология. Экологических параметров технологии может быть несколько: например, содержание солей разных тяжёлых металлов. Придётся сравнивать не только технологии, но и загрязняющие вещества по степени их опасности; именно затруднения с решением этой задачи – одна из причин критики подхода на основе ПДК.

Как будет организована система платежей по принципу НДТ за негативное воздействие на окружающую среду в России пока во многом неясно. В прежней системе выбросы, по объёму не превосходящие НДС, благополучно облагались платежами (именно такие платежи составляли основную часть поступлений по данному виду сборов), хотя этот порядок многократно подвергался критике со стороны самых разнообразных лоббистов: мол, если норматив воздействия не превышен, то за что платить-то? Но плата источника сбросов загрязнённых вод за негативное воздействие на окружающую среду – это не мера по охране одного отдельно взятого пруда. Это – лишь малая часть системы мер по защите биосферы. Суммарное воздействие цивилизации на биосферу по оценкам, полученным согласно разным методикам [19, 20], уже более ста лет превышает допустимый объём (несущую ёмкость биосферы) и продолжает

возрастать, что обуславливает углубление глобального экологического кризиса; оно проявляется в непрерывном ухудшении значений практически всех глобальных экологических характеристик (точнее, всех за исключением концентрации озона в озоновом слое, которая перестала снижаться после выполнения всеми странами требований Монреальского протокола по озоноразрушающим веществам). Именно из-за глобального характера экологического кризиса платить надо за любые негативные воздействия на окружающую среду, поскольку биосфера уже не в состоянии нейтрализовать всю совокупность таких воздействий, исходящих от современной цивилизации.

Распространена наивная вера в то, что благодаря изменениям в природоохранительном законодательстве, определившем ориентацию именно на такой принцип, НДТ, как по мановению волшебной палочки, будут активно (или, хотя бы, активнее, чем до сих пор) внедряться в практику. Удивительно, сколько по этому поводу написано откровенной чепухи – к счастью, не в научных изданиях. Увы, нет: никакие справочники и реестры НДТ не будут способствовать их внедрению в материальное производство, их единственная роль сводится пока к использованию при расчёте платы за негативное воздействие на окружающую среду. Для внедрения самих НДТ в производство, а не их перечней в практику начисления экологических платежей, нужны не перечни, а заинтересованность предприятий в природоохранных мерах и наличие у них финансовых и прочих возможностей для её материализации. Изменение системы экологических платежей может способствовать возбуждению такой заинтересованности, но главное здесь – не выбор между ПДК и НДТ, а размер базовых ставок и прочих параметров системы.

В 1990-е гг. 90% от сбора экологических платежей поступали в экологические фонды⁸ [21], платежи за водопользование – в водные фонды. С момента организации последних в 1996 г. между экологами и водохозяйственниками шёл непрерывный спор о том, куда должны направляться платежи за негативное воздействие на водные объекты: в экологические или в водные фонды. Это были целевые бюджетные фонды, самостоятельные финансовые организации, средства

⁸ В системе экологических фондов было три уровня: федеральный, региональный (так называемый «субъектовый»), местный (муниципальный)

которых могли быть потрачены только на экологические и, соответственно, водоохранные и водохозяйственные цели, ни в коем случае не на зарплату или премии и т.п. персоналу экологических, водноресурсных и водохозяйственных органов.

Прежде чем этот спор разрешился, и те и другие фонды были ликвидированы. Руководство Минфина настояло на том, что соответствующие платежи должны направляться прямо в консолидированный государственный бюджет (та же участь постигла, за тремя исключениями, и все остальные целевые бюджетные фонды). Логика этого решения была очень простая: Минфин лучше знает, как распределять бюджетные средства между различными направлениями их использования. Если бы это было действительно так...

Работники водноресурсных, водохозяйственных и экологических служб были заинтересованы в высокой собираемости платежей, поступавших в водные и экологические фонды. Казалось бы, такая заинтересованность может возникать только в случае, если персонал что-то получает из фондов, но ведь это было запрещено законом! Действительно, за все 1990-е гг. не было выявлено ни одного случая «запуска рук» в карман фондов (нецелевое использование несколько раз обнаруживалось, но не ради собственной выгоды, а для каких-либо местных нужд, на финансирование которых не находилось средств в местных бюджетах). Что же было причиной отмеченной заинтересованности? Ответ простой: средства фондов в значительной степени тратились на оснащение экологических и водных служб приборами, компьютерами, транспортом, что улучшало условия труда, поднимало его результативность, требовало повышения квалификации персонала. В результате именно экологические платежи характеризовались самой высокой собираемостью среди всех налогов и сборов – более 90%.

При действующих ставках платежей ни водные, ни экологические сборы не могут обеспечить в полной мере финансирование соответствующих органов управления. Однако в перспективе (к сожалению, далёкой) ситуация должна измениться на противоположную: такие сборы должны перекрывать затраты на содержание этих органов и пополнять бюджет. Такая ситуация будет свидетельствовать об адекватной оценке обществом как значимости водных

ресурсов, так и экологического ущерба, наносимого негативными воздействиями на окружающую среду.

Субсидии как способ выполнения социальных ограничений

Социальные ограничения в управлении водными ресурсами и водным хозяйством возникают, когда сложившаяся ценовая конъюнктура 1) не оставляет каким-либо социальным группам возможности удовлетворять потребности в воде и услугах водного хозяйства по объёму и качеству, которые государству представляются необходимыми, 2) не даёт возможности развиваться или хотя бы функционировать видам деятельности, которые государству представляются безусловно целесообразными. Основной экономический способ учёта социальных ограничений – субсидии таким группам населения и предприятиям (организациям), занимающимся соответствующими видами деятельности. Вопрос в том, какие требования следует налагать на субсидии. Во-первых, они не должны наносить никакого ущерба тем экономическим агентам, которые, собственно, и обеспечивают своей производственной деятельностью удовлетворение соответствующих потребностей (например, субсидии потребителям воды не должны осуществляться за счёт водоканалов). Во-вторых, валовой объём субсидии для её получателя (неважно, прямым или косвенным способом осуществляется это получение) должен зависеть от объёма его деятельности (объёма потребления субсидируемого ресурса). В-третьих, удельный объём субсидии для её получателя должен зависеть от качества его деятельности (например, удельная субсидия растениеводу – скажем, в расчёте на единицу продукции – тем больше, чем меньше он затрачивает воды на производство этой единицы). В-четвёртых, удельный объём субсидии должен зависеть от социальной значимости причины субсидирования.

Из перечисленных четырёх требований в российской системе управления водопользованием выполнено только второе, здесь всё очевидно, и если не озабочиваться остальными требованиями, особых проблем с механизмом субсидирования не возникает. Они возникают при внедрении такого одноногого (вместо четырёх опор) механизма в практику. Невыполнение первого требования извращает саму идею субсидирования; надеяться, что система без его

выполнения будет удовлетворительно функционировать, можно только при уверенности в том, что любые возникающие осложнения разрешит обком. Третье требование препятствует превращению субсидиарной системы в кормушку для паразитов, способы выполнить его разнообразны, их выбор зависит от конкретных условий. Четвёртое условие, к сожалению, трудно квантифицировать, оно апеллирует к выявлению общественных предпочтений и их количественной оценке или хотя бы упорядочению по значимости – задаче, которая даже в государствах с развитым гражданским обществом приемлемо решается не так уж часто, и тем чаще, чем меньше масштаб социума, который её поставил (например кантон в Швейцарии или муниципалитет в Швеции).

Система субсидий в СССР складывалась стихийно, как систему её никогда не рассматривали; конечно, беспокоились о том, чтобы своевременно уловить социальные напряжения и смягчить их установлением субсидий, но далее следовало согласование с Минфином (если оно требовалось) и надежда на то, что обкомы и пр. всё расставят на свои места. Российская Федерация унаследовала советскую систему субсидий и советское же бессистемное отношение к ней. Обкомов теперь нет, хотя Народный фронт иной раз и пытается имитировать их деятельность в некоторых аспектах, а рынок ничего не может «расставить по своим местам» из того, что связано с проблематикой субсидий. Проблему субсидий – вообще и в водопользовании в частности – должно решать государство вместе с гражданским обществом, чем быстрее, серьёзнее и ответственнее они этим займутся, тем больше шансов на успех в приемлемые сроки и с некатастрофическими потерями.

* * *

Для практики управления водными ресурсами и водным хозяйством экономическая наука может, помимо разработки понятийного аппарата, предложить лишь отдельные инструменты, прежде всего – экономико-математические модели со специфической гидрологической и водохозяйственной «начинкой», которые должны помочь работникам системы управления в реализуемых ими процессах подготовки и принятия решений.

В силу всех изложенных причин эти решения не могут быть оптимальными. С почти 100-процентной вероятностью они будут нуждаться в корректировке в процессе реализации. Для такой корректировки, естественно, понадобятся те же инструменты, которые использовались при подготовке решений. Главное, однако, не в инструментах. Необходима обратная связь системы управления с управляемым объектом. Необходима система мониторинга реализации управленческих решений. Необходимы быстрые реакции на выявляемые несоответствия целей принятых решений практике их реализации. Это – азбучные кибернетические истины. Нынешняя неповоротливая, коррумпированная система управления российской экономикой этим требованиям, очевидно, не соответствует. Очевидно также, что существенно изменить её к лучшему в одной, отдельно взятой отрасли, к тому же самой сложной с точки зрения возникающих в ней задач управления, не удастся. Тем не менее гидрология и водохозяйственная наука хотя бы ради создания задела для будущего должны, не ослабляя усилий, заниматься этими задачами и бороться за внедрение получаемых результатов в практику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольшевский [И.]. Бюрократия. М.: Изд-во В.М. Саблина, 1906. – VIII, 417 с.
2. Crozier M. The Bureaucratic Phenomenon. Chicago: University of Chicago Press, 1963. – 342 p.
3. Гудков А., Левада Ю., Левинсон Ф., Седов Л. Бюрократизм и бюрократия: необходимость уточнений // Государство и право. – 2004. №1. – С. 45–57.
4. <http://rulaws.ru/Vodnyy-kodeks/>
5. <http://base.garant.ru/10108700/>
6. Акутагава Рюноске. Сочинения. В 4 т. Т. 3. М.: Полярис, 1998. – 447 с.
7. Юнг К.Г. Архетип и символ. М.: Канон+, 2015. – 336 с.
8. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М.: Научный мир, 2010. – 232 с.
9. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты. М.: Наука, 2006. – 221 с.
10. Малышев Б.С. Общая теория ренты. Томск: ФЖ ТГУ, 2012. – 196 с.

11. Яковец Ю.В. Рента, антирента, квазирента в глобально-цивилизационном измерении. М.: Академкнига, 2003. – 240 с.
12. Ушаков Е.П. Рентные отношения водопользования в России. Серия: Экономическая наука современной России. М.: Наука, 2008. – 303 с.
13. Данилов-Данильян В.И. Природная рента и управление использованием природных ресурсов // Экономика и математические методы. 2004. Т. 40, №3. – С. 3–15.
14. Бобылёв С.Н., Минаков В.С., Соловьёва С.В., Третьяков В.В. Эколого-экономический индекс регионов РФ. М.: WWF России; РИА Новости, 2012. – 152 с.
15. [Ohttp://studopedia.ru/10_33541_skorrektirovannie-istinnie-chistie-sberezheniya-istinnie-sberezheniya.html](http://studopedia.ru/10_33541_skorrektirovannie-istinnie-chistie-sberezheniya-istinnie-sberezheniya.html)
16. Данилов-Данильян В.И., Рывкин А.А. Некоторые методологические проблемы экономики научно-технического прогресса // Экономика и математические методы. 1984. Т. 20. Вып. 6. – С. 1084–1102.
17. Пигу А. Экономическая теория благосостояния. В 2 т. Серия: Экономическая мысль Запада / Пер. с англ. М.: Прогресс, 1985. – 512, 456 с.
18. Данилов-Данильян В.И. Теорема Коуза: попытка диагноза // Вестник РАН. 2012. Т. 82. № 9. – С. 814–822.
19. Горшков В.Г. Структура биосферных потоков энергии // Ботанический журнал. 1980. 65. №11. – С. 1579–1590.
20. Vitousek P.M., Erlich P.R., Erlich A.H.E., Matson P.A. Human appropriation of the products of photosynthesis // Bioscience. 1986. 36. – P. 285–301.
21. Аверченков А.А. и др. Экологические фонды: теория и практика. М.: Радио и связь, 1995. – 208 с.

Водопользование в условиях неопределённости

В.И. Данилов-Данильян, И.Л. Хранович

Проблема

Посредниками между природными объектами и водопользователями выступают водохозяйственные системы (ВХС), объединяющие средства получения, перераспределения, очистки и доставки водных ресурсов, согласуя потребности производства и общества в водных ресурсах с возможностью их удовлетворения. Стратегии развития ВХС взаимосвязаны со стратегиями развития претендентов на водные ресурсы – водопользователей. Трансформации структур, параметров и режимов функционирования ВХС предопределяются запросами пользователей на водные ресурсы и сброс сточных вод. Пользователи формируют свои запросы, ориентируясь на предполагаемые возможности ВХС. Как правило, совокупность запросов пользователей, конкурирующих за воду и за право сброса сточных вод, значительно превосходит возможности их удовлетворения. Возникает проблема выработки согласованных стратегий развития и функционирования ВХС и пользователей, в решении которой целесообразно участие как тех, кто преобразует природную воду в товар, производит водохозяйственные услуги и т.п. – ВХС, так и тех, кому необходимы вода и эти услуги – водопользователей.

ВХС являются элементами инфраструктуры по обеспечению водными ресурсами производства и населения. Для обеспечения устойчивого развития водоёмких отраслей, удовлетворения потребностей населения в воде и услугах водного хозяйства, сохранения экологически приемлемой среды обитания требуется опережающее развитие ВХС, которые представляют собой сложные природно-технические комплексы, проектирование, строительство и реконструкция которых требуют значительных затрат труда, капиталовложений и времени. Соответствующие этому стратегии развития ВХС в увязке со стратегиями развития пользователей, которые также являются сложными системами, должны охватывать достаточно длительный расчетный период. Такие стратегии приходится выработать в условиях значительной неопределённости структуры, форм и масштабов водопользования, обусловленной научно-техническим прогрессом и коренным преобразованием всей систе-

мы хозяйствования. Необходимость рассмотрения функционирования и развития ВХС в неопределённых условиях обусловлена также возрастающей антропогенной нагрузкой на природные объекты, при которой возможны необратимые экологические последствия. В частности, с развитием водоёмких производств, при котором возрастают объёмы используемых водных ресурсов, увеличиваются массы сбросных вод. Неопределённость условий функционирования и развития ВХС проявляется также в изменении отношения общества к влиянию хозяйственной деятельности на природные объекты. С ростом благосостояния и уровня образования повышаются требования к качеству окружающей среды. Общество все больше поворачивается лицом к природе, в связи с этим меняются оценки ВХС как природно-технических систем. Значительная неопределённость условий развития и функционирования ВХС обусловлена также возможными изменениями характеристик водных ресурсов, которые могут существенно трансформироваться, например, в связи с возможными изменениями климата. Наряду с неопределённостями условий развития и функционирования ВХС, обусловленные внешними заранее неизвестными обстоятельствами, присутствуют внутренние неопределённости из-за неизвестности поведенческих стратегий конкурентов – пользователей, претендующих на общие водные ресурсы.

Неопределённости условий, в которых могут оказаться ВХС в будущем, порождают трудности планирования, связанные с необходимостью принятия детерминированных решений о параметрах ВХС и режимах их функционирования. Эти условия зарождают риск снижения эффективности использования водных ресурсов из-за возможного несоответствия принятых управляющих решений реальным условиям, в которых приходится осуществлять такие решения.

Гарантированное водопользование

Для формирования согласованных стратегий пользователей, претендующих на общие водные ресурсы в неопределённых условиях, естественно обратиться к подходу, принятому в теории управления ВХС [10]. На пути снижения риска в управлении водным хозяйством в стохастических условиях, вызванных внешними зара-

нее неизвестными обстоятельствами, возникли понятия располагаемый водный ресурс [23], гарантированная отдача (гарантированное водопользование) [16], гарантированное качество водных ресурсов [2] и их надёжности. Располагаемый водный ресурс – ориентировочное количество водного ресурса, его надёжность – вероятность того, что этого ресурса будет не меньше. Гарантированное водопользование, выполняющее функцию ориентировочного планового показателя, является расчётным количеством (расходов и/или объёмов) водных ресурсов, предоставляемых пользователю; его надёжность – вероятность того, что фактическое поступление водных ресурсов не меньше гарантированного. Гарантированное качество водных ресурсов характеризуется совокупностью расчётных качественных характеристик воды в водоёмах, предоставляемой пользователям и отводимых ими; его надёжность определяется вероятностью того, что действительное качество водных ресурсов не хуже гарантированного по всем показателям качества.

В любой хозяйственной деятельности водные ресурсы используются в комплексе с другими ресурсами, расход которых зависит от режима и качества водных ресурсов, не только тех, которые присутствуют в хозяйственной системе, но и тех, в расчете на которые строились её планы в стохастических условиях. Это – разные величины. Если водные ресурсы – один из критических факторов (и даже главный критический фактор, как в орошаемом земледелии), то все процессы планирования и управления деятельностью организаций-водопользователей в качестве важного входного параметра используют данные о том количестве и качестве этих ресурсов, на которые можно ориентироваться при принятии решений. Именно для этого применяются показатели гарантированного водопользования и гарантированного качества. Показатели гарантированных режимов и гарантированного качества водных ресурсов определяют не только проведение необходимых подготовительных работ и использование других ресурсов, но и планируемые результаты – количество вырабатываемой продукции (в том числе транспортных и рекреационных услуг), предотвращённый ущерб от наводнений и т.п. Отклонение реализуемых режимов и качества водных ресурсов от гарантированных показателей приводит к необходимости коррек-

тировки принятых решений и компенсации связанных с этим потерь – дополнительных затрат, упущенной прибыли и т.д.

Подготовка полей к орошению включает ремонт и «настройку» оросительной сети, закупку новой и/или ремонт имеющейся техники, выбор структуры посевов с организацией необходимого обеспечения и другие работы, она проводится до того, как состоялась конкретная реализация стохастических условий поступления водных ресурсов, в расчёте на их использование в объёме гарантированных значений и при гарантированном качестве. Поступление воды в объёме меньше гарантированного означает недополив при орошении и, следовательно, уменьшение урожайности, а также делает лишними часть подготовительных работ. Использование водных ресурсов сверх гарантированного значения не всегда возможно. Если оросительная сеть и состав сельскохозяйственных культур такую возможность допускают, то включение дополнительной техники, персонала и организация дополнительных работ осуществляются со значительно меньшей отдачей, чем использование объёма водных ресурсов, на который была сориентирована оросительная система.

Показатели гарантированного водопользования и гарантированного качества водных ресурсов, которые характеризуют возможности ВХС как партнера в хозяйственной деятельности, полностью переносятся на более общие условия неопределённости, которая с привлечением субъективно вероятностной трактовки трансформируется в стохастичность. Информация о ситуациях в будущем является неопределённой, она либо обладает, либо не обладает стохастической устойчивостью. Неопределённые условия, о которых удалось получить данные наблюдений, достаточные для применения объективно-вероятностного подхода, рассматриваются как объективно стохастические. Если же непосредственное использование данных прошлых наблюдений недостаточно, чтобы выявлять закономерности поступления и использования ресурсов, на помощь приходит субъективно вероятностный подход, основанный на экспертных оценках различных возможных природных ситуаций и условий хозяйственной деятельности. Будучи нормированы, эти оценки обладают всеми свойствами вероятностей: они неотрицательны, их сумма равна единице, оценка значимости совокупности

возможных условий равна сумме оценок значимостей условий, входящих в эту совокупность. Субъективные и объективные вероятности совместно включаются в комплекс оценок возможных ситуаций функционирования и развития систем в «стохастических» условиях.

Заметим, что термин «гарантированное водопользование» не вполне соответствует содержанию обозначаемого им понятия. На самом деле в рассматриваемых ситуациях никаких гарантий в системе централизованной плановой экономики, когда он был введён, не предполагалось. В случае отклонения текущих значений водопользования от гарантированных в нежелательную для потребителя сторону он не получал никаких компенсаций – ни непосредственно от государства, ни от его представителя – ВХС. Термин «гарантия» даже в советской экономике использовался применительно к ситуациям, когда производитель продукции в случае обнаружения её несоответствия нормативному качеству в течение гарантийного срока заменяет либо ремонтирует её, в крайнем случае, компенсирует потребителю его издержки, т.е. – в конечном счёте – выполняет своё обязательство перед ним. Ничего подобного гарантийное водопользование не предусматривало, да это и в принципе невозможно в данном случае, если не прибегать к чрезмерно расширительным трактовкам понятия «гарантия». Ещё менее соответствует концепция гарантированного водопользования механизмам гарантирования в рыночной системе. Представляется, что в соответствии с их реальным смыслом показатели гарантированного водопользования правильно назвать ориентирами: это те объёмные, режимные и качественные характеристики водных ресурсов, на которые водопользователи ориентируются при составлении планов своей деятельности, с которыми согласовываются показатели потребления всех прочих ресурсов и организационные мероприятия. Несмотря на неадекватность традиционной терминологии, в дальнейшем она иногда используется, наряду с понятием «ориентир».

Производственные функции

Принятие подхода, в котором возможные условия хозяйствования и их субъективные вероятности отражают накопленный опыт и знания экспертов, даёт возможность перенести методологию гарантированного водопользования и его надёжности на построение про-

изводственных функций, оценивающих результаты использования ресурсов в условиях неопределённости. Значения этих функций зависят от двух групп переменных, соответствующих реально используемым в хозяйственной деятельности ресурсам и их предполагаемым значениям – ориентирам [12]. Реальные переменные могут принимать различные значения при различных реализациях стохастических условий функционирования ВХС. С ориентировочными количествами используемых ресурсов связано планирование необходимых подготовительных работ и других ресурсов, не учитываемых явно при оценке результатов производства. Значения виртуальных переменных, соответствующих ориентирам, одни и те же при всех реализациях стохастических условий. Отклонения реализуемых количеств водных ресурсов и масс содержащихся в них примесей от ориентиров приводят к необходимости корректировки принятых решений и потерям в результатах хозяйственной деятельности.

Производственные функции, оценивающие результаты использования ресурсов, представимы в виде сумм двух функций, одна из которых характеризует результат использования ресурсов в объёме, равном ориентиру, другая описывает потери результата, обусловленные отклонениями объёмов используемых ресурсов от их ориентировочных величин. Под функцией, оценивающей потери результата, её называют функцией ущерба, понимается математическое ожидание ущерба, обусловленного функционированием потребителей ресурсов в различных стохастических условиях. При использовании ресурсов в объёме, равном величине ориентира, нет необходимости в коррекции запланированного решения, функция ущерба равна нулю. В режиме использования избытков ресурсов, утилизация дополнительных ресурсов возможна только при наличии потребности в них и условий для её удовлетворения. Например, речной транспорт может использовать избыточные глубины только при наличии судов с большой осадкой и дополнительных грузов, которые необходимо перевезти. Использование избыточных ресурсов осуществляется со значительно меньшей эффективностью, чем предполагаемых (т.е. при дополнительном значении того же объёма ориентира). Использование ресурсов при их дефиците характеризуется увеличением стоимости вырабатываемой продукции, а при

превышении дефицитом некоторого предела – невозможностью её производить. Дополнительные затраты на поддержание данного уровня производства (в первом случае) и компенсации потерь от недодачи продукции (во втором) значительно превосходят эффект от использования предполагаемых объёмов ресурсов. Это означает, что при дефиците ресурсов функции ущерба отрицательны и их значения резко убывают с ростом дефицита. Таким образом, результат использования ресурсов в ориентировочных объёмах (это – «идеальные» условия) выше результата использования ресурсов в тех же объёмах, которые получаются в реальных стохастических условиях, когда поставляемые объёмы отклоняются от ориентиров. Целесообразность включения ориентировочных величин используемых ресурсов в оценку результатов функционирования производства определяется также тем, что результат использования дополнительных ресурсов не превосходит результата использования того же ориентировочного количества (как правило меньше), а снижение результата производства при непредусмотренном дефиците ресурсов не меньше (как правило значительно больше), чем то, которое является следствием уменьшения ориентировочной величины ресурса.

Производственные функции, зависящие от показателей водных ресурсов в различных стохастических условиях и их ориентировочных значений, предоставляют возможность в явном виде представить риск снижения результата деятельности вследствие неполного (в сравнении с ориентиром) обеспечения ресурсами и шанс повышения результата, обусловленный получением дополнительного (относительно ориентира) количества ресурсов. Под риском в данной работе понимается математическое ожидание потери результата из-за получения ресурсов в количестве, меньшем ориентировочного. В соответствии с этим риск определяется через описанную производственную функцию как математическое ожидание значений функции ущерба от недополучения ресурсов в различных исходах стохастических условий. Шанс представляет собой математическое ожидание увеличения результата деятельности вследствие использования дополнительного количества ресурсов и также выражается через введённую производственную функцию как математическое ожидание значений функции ущерба от прироста резуль-

татов при реализации исходов стохастических условий, в которых значение получаемого ресурса превосходит величину его ориентира. Из определений риска и шанса следует, что производственную функцию можно представить в виде суммы функций, слагаемые которой: функция, оценивающая результат использования ресурсов в объёме, равном ориентиру, риск и шанс.

Производственные функции, зависящие от показателей водных ресурсов в различных стохастических условиях и их ориентировочных значений, предоставляют возможность при согласовании стратегий водопользования оценивать надёжность ориентировочного количества ресурсов. Она определяется в виде сумм вероятностей событий, в которых объёмы предоставляемых ресурсов не меньше их ориентировочных величин [12].

Подход к согласованию интересов конкурирующих субъектов

В поисках методологических основ создания механизмов разрешения конфликтных ситуаций водопользования естественно обратиться к известным подходам согласования интересов конкурентов, претендующих на общий ресурс. Структурой, в рамках которой происходит согласование интересов пользователей, видится рынок, выполняющий роль экономического регулятора.

Весьма привлекателен механизм взаимодействия участников рынка в условиях совершенной конкуренции, характеризующейся незначительным воздействием отдельных элементов на общие для всей системы показатели управления. В этом случае пользователи могут выбирать стратегии, руководствуясь своими интересами, независимо от поведения других участников. Для того, чтобы такой рынок состоялся, должна быть выполнена совокупность предпосылок:

- стихийное установление цен в процессе свободной конкуренции, когда ни один из участников не обладает достаточной долей ресурса или спроса, чтобы влиять на его цену.
- отсутствуют ограничения, препятствующие совершению сделок между любым покупателем и любым продавцом;
- отсутствуют факторы, кроме предложения ресурса и спроса на него, влияющие на установление цены;

- нет ограничений для появления новых участников рынка и ухода с него уже действующих;
- участники рынка обладают полной информацией, необходимой для выбора партнёров сделок и принятия решений о сделках;
- поведение участников рынка является рациональным (объяснимым собственными экономическими интересами);
- затраты на проведение сделок пренебрежимо малы.

В действительности такое идеализированное взаимодействие продавцов и покупателей, как правило, отсутствует. Типичным является рынок несовершенной конкуренции, в котором участники сделок могут влиять на цены продукции и пользователям приходится ориентироваться на предполагаемые стратегии поведения других участников. Влияние отдельных продавцов и покупателей на цены, устанавливаемые на рынке, особенно значимо проявляется в системах, включающих небольшое число участников. Показательным примером рынка несовершенной конкуренции являются трансграничные водохозяйственные системы. В них небольшое число пользователей, претендующих на водные ресурсы трансграничного водного объекта, могут влиять на показатели управления, общие для всей системы, в частности, на цены за воду и иные услуги водного хозяйства (водоотведение и пр.).

Ситуация несовершенной конкуренции (олигополия/олигопсония) заставляет пользователей ориентироваться на предполагаемые стратегии поведения других участников. Общая теория несовершенной конкуренции отсутствует. Рассматриваются отдельные модели-схемы поведенческих ситуаций. В модели олигополии Курно фирмы конкурируют, выбирая объёмы производства, цены устанавливает рынок [22]. В модели Бертрана фирмы назначают цены, оставляя рынку возможность определять объёмы производимой продукции [21]. В модели Штакельберга предполагается существование ведущей фирмы, которая первой устанавливает объём своего производства, остальные фирмы ориентируются на неё [25]. Набор предполагаемых стратегий поведения конкурентов непредсказуем. Это означает, что согласование интересов участников рынка с использованием отдельных моделей – схем конкурентного поведения (или их комбинаций) более чем проблематично.

Для создания механизмов согласования интересов водопользователей неизбежным стало обращение к теоретико-игровому подходу, ориентированному на анализ конфликтных ситуаций, где каждая из сторон активна и имеет возможности индивидуального выбора, от которого зависит не только её собственный конечный результат, но и результаты других участников. Продуктивным явилось рассмотрение игр с двухуровневой структурой разрешения конфликтных ситуаций, которая отражает особенности взаимодействия ВХС, представляющей верхний уровень, и пользователей, образующих нижний уровень [11]. На возможности, заложенные в таких конфигурациях для формирования механизмов согласования интересов конфликтующих субъектов, впервые обратил внимание Г. Штаккельберг [25], который предложил из конкурирующих производителей выделить ведущую фирму, устанавливающую объём своего производства первой. Остальные фирмы ориентируются на неё (цели, отражающие коллективные блага, не предполагались). Цели, общие для всех конкурентов, появились в работах по моделям оптимального перспективного планирования [1], теории активных систем [3, 4] и в теории игр с непротивоположными интересами [5, 8, 9]. Цель, общая для всех игроков, рассматривается как цель управляющего органа – центра, представляющего собой верхний уровень системы. Нижний уровень образуют элементы этой системы – игроки. (В теории игр с непротивоположными интересами такая структура явно организационно не выделяется, хотя фактически подразумевается). В производстве продукции (понимаемой в широком смысле) центр обычного непосредственного участия не принимает. Он влияет на выбор элементами своих стратегий назначением показателей, которыми оценивается качество их функционирования, либо через какие-либо иные параметры.

В ситуациях конкурентного согласования интересов участники прилагают усилия для обеспечения себе условий наилучшего использования ресурсов. При этом они стремятся минимизировать свой риск и не упустить свой шанс, возникающие из-за неопределённости, порождаемой внешними обстоятельствами и неизвестностью относительно действий других активных участников. Однако во всех моделях согласования, описывающих как совершенную, так и несовершенную конкуренцию, риск и шанс в явном виде не пред-

ставлены. Начиная с работ Курно и Бертрана, в моделях согласования незримо присутствует концепция «вначале требуется разработать механизмы разрешения конфликтов в детерминированных условиях, а затем можно будет переходить к более общим ситуациям, в частности, к согласованию интересов в условиях неопределённости, обусловленной внешними заранее неизвестными обстоятельствами». Этот принцип «от простого к сложному» вошёл в противоречие с необходимостью учёта всех существенных факторов исследуемого процесса. Водные объекты функционируют в стохастических условиях поступления и использования водных ресурсов. В рамках детерминистского подхода невозможно формализованное адекватное представление рисков и шансов и, следовательно, нереально ожидать появления «общей теории» согласования интересов конкурирующих субъектов.

Ситуация с согласованием интересов конкурирующих субъектов, в которой они могли бы вырабатывать приемлемые стратегии, представлялась безвыходной. Однако на основе принятых в теории управления водными ресурсами в стохастических условиях понятий гарантированных водопользования и его надёжности выявилась возможность разработать подход и реализующие его механизмы к согласованию интересов пользователей, претендующих на общие ресурсы, представляющие собой выход из этой тупиковой ситуации. Развиваемый подход свободен от необходимости каждому участнику ориентироваться на предполагаемые стратегии поведения партнёров в условиях несовершенной конкуренции соперничества пользователей водного объекта. Согласование интересов конкурентов – водопользователей основывается на методологии активных систем, принципе открытого управления и учёте особенностей поступления и результативности использования водных ресурсов. Центральное место занимают зависимости результатов водопользования (производственные функции) как от используемых в различных стохастических условиях объёмов водных ресурсов и содержащихся в них масс примесей, так и от их ориентиров (так называемых гарантированных значений этих показателей). Базовые математические модели, используемые в согласовании интересов пользователей ресурсов водных объектов, основаны на естественном представлении ВХС виде сети с потоками, соответствующими потокам воды

и примесей. В этих моделях в явном виде присутствуют риски, шансы и надёжности гарантированного водопользования [14].

Предлагаемые механизмы согласования интересов пользователей, претендующих на ресурсы водных объектов, рассматриваются в двух возможных ситуациях разработки стратегий использования этих ресурсов:

- соглашение об использовании водного объекта либо отсутствует, либо заключено между частью водопользователей этого объекта;
- такое соглашение существует, требуется его пересмотр.

Согласование интересов пользователей, объединённых в ВХС водохозяйственной сетью и общностью используемых ресурсов, осуществляется в стохастических условиях с учётом количественных и качественных показателей водных ресурсов, как в статической постановке, так и в динамической постановке с дискретным временем.

Рассматриваются ситуации функционирования, выбора параметров и развития ВХС. При рассмотрении проблемы функционирования предполагаются известными: структура ВХС, параметры элементов и их характеристики, а также физические условия, технические, экономические, экологические и социальные требования, предъявляемые к ВХС как составной части хозяйства и элементу окружающей среды. При выборе параметров, наряду с существующими структурой, параметрами и характеристиками ВХС, предполагаются известными также избыточный набор реконструируемых и вновь строящихся элементов с их возможными параметрами и характеристиками. В проблеме выбора параметров каждому варианту развития элемента соответствует свой момент ввода, этапность изменения параметров не учитывается. Проблема развития ВХС отличается от проблемы выбора параметров учётом в ней этапности ввода вариантов, предполагающей возможность изменения параметров элементов и технологии использования водных ресурсов во времени [13, 14].

Структура согласования

Формирование компромиссных стратегий использования общих ресурсов, на которые претендуют конкурирующие субъекты, происходит в организационных структурах (центрах), в рамках которых происходит согласование интересов пользователей. Для реализации

выработанных стратегий решения центра обязательны для всех участников, делегирующих центру полномочия в разрешении конфликтных ситуаций. В частности, разрешение конфликтных ситуаций, связанных с использованием трансграничных водных объектов, происходит в образуемых трансграничными государствами межгосударственных центрах таких, как Дунайская, Рейнская, Индская комиссии. Центр, согласующий интересы использования ресурсов внутригосударственных водных объектов «самостоятельными» пользователями, представлен государственными организациями.

Интересы центров отражают коллективные интересы пользователей, стремящихся разрешить конфликтные ситуации, обусловленные общностью используемых ресурсов. Поэтому процедуры формирования согласованных стратегий использования ресурсов, проводимые в центрах, принципиально могут быть только открытыми. Основа этих процедур – принцип открытого управления (честной игры), предполагающий активное участие центра и претендующих на общие ресурсы участников в формировании согласованных стратегий, способствует выработке компромиссных решений и их осуществимости. Это означает, что центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений, а пользователи знают возможные стратегии и принципы стимулирования принимаемых решений.

Формирование механизмов согласования интересов пользователей в данной работе основывается на теории активных систем и реализует принцип открытого управления. Пользователи и центр образуют активную двухуровневую систему, в которой центр – верхний уровень; пользователи образуют нижний уровень. Центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений. Пользователи – активные элементы знают возможные стратегии и принципы стимулирования принимаемых решений. Они реализуют собственные предпочтения, целенаправленно манипулируя информацией о своих возможностях, целях и эффективности. Компромиссные стратегии пользователей вырабатываются в рамках базовой задачи, формируемой центром с использованием функций предпочтений, сообщаемых элементами. Центр влияет на эффективность функционирования элементов выделением ресурсов и назначением их цен, которые определяются в результате

решения базовых задач. Элементы стремятся максимизировать показатели эффективности, связанные с их функционированием. Центр максимизирует функцию, которой оценивается эффективность функционирования всей системы. Он добивается согласованности, при которой элементы, преследуя собственные цели, реализуют состояния, обеспечивающие достижение целей системы.

Рассматриваются три варианта формирования соглашений об использовании водного объекта и соответствующие им базовые задачи: рациональное использование водных ресурсов (без явного учёта их качества), управление качеством водных ресурсов (в предположении, что их количественные показатели фиксированы) и совместное управление количеством и качеством водных ресурсов. В рамках каждого из вариантов рассматриваются три подварианта. В одном согласование интересов происходит при фиксированных параметрах водопользователей, в другом – не только согласуются интересы элементов, но и выбираются их параметры, в третьем – допускается возможность изменения параметров во времени.

Пересмотр соглашений об использовании водных ресурсов и сбросе сточных вод осуществляется в рамках управляемого центром рынка воды и услуг по водоотведению, функционирующего в стохастических условиях.

Предложенные механизмы разрешения конфликтных ситуаций водопользования, с различной полнотой и подробностью учитывающие особенности эксплуатации водных ресурсов и управления их качеством, объединяются в комплекс, в котором с использованием математических моделей последовательно уточняющих решения, стратегии сравниваются, отбраковываются и выбираются рациональные [14].

Базовые задачи

Формирование согласованных стратегий пользователей, претендующих на водные ресурсы и связанные с ними услуги ВХС, сначала рассматриваются в статической постановке.

Центр – метаигрок с правом первого хода, управляет согласованием интересов водопользователей, распределяя водные ресурсы и массы примесей, а также назначая за них цены, которые определяются в рамках базовой задачи. Он проводит встречный способ планирования и реализует механизм открытого управления, тем самым

влияет на выбор игроками нижнего уровня – пользователями своих состояний. Каждый цикл планирования состоит из четырёх этапов. На первом этапе элементы сообщают в центр свои функции предпочтения. На втором – центр на основании полученных функций предпочтения определяет план системы. На третьем этапе элементы выбирают свои состояния. На четвёртом – определяются достигнутые значения целевых функций элементов и всей системы. Механизм управления предполагается постоянным. Его изменение требует существенных материальных, временных, трудовых, социально-психологических и других затрат.

Инструментами управления являются объёмы воды, выделяемые пользователям, и массы примесей, отводимых ими в водные объекты, а также цены за воду и услуги водоотведения. Величины объёмов воды и масс примесей, а также цены определяются в результате решения базовых задач, описывающих функционирование и выбор параметров ВХС. В них максимизируется результат использования водных ресурсов всей ВХС, оцениваемый достигнутыми значениями производственных функций пользователей.

Базовые задачи, подробно рассмотренные в [13, 14], представляют собой двухэтапные задачи стохастического программирования на сети, конфигурация которой воспроизводит конфигурацию моделируемой ВХС. Стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, выступают потоки, моделирующие значения ориентиров объёмов водных ресурсов и масс содержащихся в них примесей. Потоки в сети, соответствующие реальным объёмам водных ресурсов и массам примесей, играют роль тактических переменными второго этапа, выбираемых при известных реализациях стохастических условий. Допустимые множества базовых задач выделяется двумя группами условий. Условия функционирования отдельных элементов характеризуются как реально доступными в различных стохастических условиях объёмами водных ресурсов и массами примесей, так и их ориентирами – гарантированными значениями этих показателей. Общесистемные ограничения, включающие описание взаимодействия элементов ВХС, в частности, уравнения баланса масс воды и примесей, выделяются в виде множества допустимых значений переменных, соответствующих только реальным величинам.

нам объёмов водных ресурсов и масс примесей. Целевые функции базовых задач оценивают математическое ожидание эффективности функционирования ВХС. Они формируются из производственных функций, сообщаемых пользователями центру, в виде их суперпозиций.

Базовые задачи – модели рационального использования водных ресурсов без явного учёта их качества и управления качеством водных ресурсов при фиксированных их количественных показателях представляют собой задачи выпуклого программирования. Решение этих задач может быть осуществлено с применением любого метода нахождения максимума вогнутой (минимума выпуклой) функции на выпуклом множестве [6,19].

Базовые задачи – модели совместного управления количеством и качеством водных ресурсов многоэкстремальные, общих методов решения которых нет. Однако особенность рассматриваемых задач, в которых максимизируются обобщённо сепарабельные функции на множествах, выделяемых наряду с линейными ограничениями, также билинейными уравнениями, позволяет построить метод их решения, представляющий собой детализацию схемы ветвей и границ [17]. Решение исходной задачи с погрешностью, не превосходящей заданную погрешность, сводится к решению конечной последовательности оценочных задач выпуклого программирования, формирование которых основано на построении вогнутых оболочек отдельных слагаемых функций цели и выпуклых оболочек ограничений на системе сужающихся прямоугольных множеств.

Базовые задачи – модели согласования интересов водопользователей при возможных изменениях технологий использования водных ресурсов, реконструкции существующих и введении в строй новых элементов дополняются взаимосвязанными булевыми переменными, положительные значения которых соответствуют принимаемым вариантам элементов ВХС. Поиск оптимальных векторов этих частично целочисленных задач нелинейного программирования также сводится к решению конечной последовательности оценочных задач выпуклого программирования, формирование которых основано на построении вогнутых оболочек отдельных слагаемых функций цели (при совместном управлении количеством и

качеством водных ресурсов и выпуклых оболочек ограничений) на системе сужающихся прямоугольных множеств.

Особенность допустимых множеств базовых задач и оценочных задач, формируемых при реализации схемы ветвей и границ, состоящая в отделимости ограничений на переменные, моделирующие значения реальных объёмов водных ресурсов и масс содержащихся в них примесей и их ориентиров, предоставляет возможность применить метод групповой координатной оптимизации, в котором последовательно отыскивается оптимум по группам системных и индивидуальных переменных [20]. Этот метод привлекателен тем, что в выработке решений взаимодействуют центр, распоряжающийся системными переменными – реальными объёмами воды и массами примесей, и пользователи, ответственные за индивидуальные переменные – ориентировочные значения объёмов водных ресурсов и масс примесей. Это даёт возможность наблюдать и оценивать последовательные приближения к оптимальному решению и переосмысливать проблему.

Механизм согласования

Центр, заинтересованный в выделении ресурсов, величины которых соответствуют оптимальным векторам базовой задачи, информацией о действительных функциях затрат элементов не обладает. Ему известны функции предпочтения, сообщаемые пользователями – активными элементами, которые должны внешне правдоподобно оценивать эффективность использования водных ресурсов и затраты водоотведения. Вместо базовой задачи центр решает некоторую сформированную задачу, допустимое множество которой совпадает с допустимым множеством базовой задачи, а целевой является функция, образованная из представленных пользователями функций предпочтения. Центр выделяет пользователям водные ресурсы и назначает отводимые массы примесей в соответствии с решением сформированной задачи[13].

Для осуществления выработанной стратегии её требуется дополнить механизмом взаимодействия центра и пользователей. Регулятором взаимоотношений «продавца» ресурсов – центра и «покупателей» – пользователей выступают цены за гарантированные поставки водных ресурсов и сброс сточных вод, а также плата за

отклонения от них. Цена, по которой центр «продаёт» пользователю выделяемые в соответствии с решением сформированной задачи гарантированные водопользование и водоотведение, определяется эффективностью использования ресурса. Целесообразно назначать цену, отражающую часть «гарантированной» прибыли, получаемой пользователем. Сложнее обстоит дело с решением проблемы назначения платы за отклонения величин текущих поставок ресурсов от их гарантированных величин.

Традиционным является маржиналистский подход к оценке изменений результатов производства и назначения цен («теневых цен») при отклонениях значений спотовых поставок от величин форвардных контрактов. В нем реализуется принцип предельной полезности – оценивания изменения результатов производства при бесконечно малом изменении количества используемого ресурса. В соответствии с этим подходом цена поставки дополнительной (сверх ориентира) или недопоставки каждой единицы ресурса является ценой «последней» планируемой к использованию единицы. Этот подход корректен для линейных целевых функций, а также для нелинейных при условии, что отклонения значений поставляемых количеств ресурсов от ориентиров незначительны. Функции ущерба пользователей нелинейные и, следовательно, такими являются функции «ущербов» представленных пользователями функций предпочтения. Величины предоставляемых количеств ресурсов могут намного отличаться от их ориентиров. При таком подходе потери эффективности, обусловленные дефицитом ресурсов, значительно превосходят компенсацию, получаемую за их недопоставку. Оплата пользователем профицита водных ресурсов превосходит результат их использования. Не спасает дела умножение теневых цен на некоторые коэффициенты, так как отсутствуют объективные предпосылки выбора значений этих коэффициентов. Поэтому предлагается перейти от назначения цен, формируемых оптимальными двойственными переменными базовой задачи, к ценам за ресурсы, соответствующим их вкладу в результативность производства [13].

Отклонения от ориентиров объёмов воды и масс примесей, поступающих пользователям и отводимых от них, приводят к изменениям результатов использования водных ресурсов. Возникает пот-

ребность в сопоставлении эффективности воздействий отклонений величин текущих поставок ресурсов от гарантированных величин. Сопоставление оценивается коэффициентами, отражающими влияние количества и качества водных ресурсов на результативность их использования элементами ВХС в различных условиях. Коэффициенты значимости отклонений объёмов водных ресурсов, а также масс поступающих и отводимых примесей неотрицательны и образуют выпуклую комбинацию. С помощью этих коэффициентов формируются комплексные оценки отклонений от ориентиров в виде взвешенных сумм отклонений объёмов водных ресурсов и масс примесей от их гарантированных величин.

В основном варианте ВХС платит пользователю за каждую единицу комплексного отклонения, приводящего к потере результативности использования водных ресурсов, по цене риска – усреднённого ущерба, определённого в результате решения сформированной задачи – аналога базовой задачи. За поставку водных ресурсов, приводящую к увеличению эффективности их использования, пользователь оплачивает каждую единицу комплексного отклонения по усредненной цене шанса её использования, определённого в результате решения сформированной задачи. Для стимулирования стремлений использовать излишки водных ресурсов (если таковые стремления высказаны пользователями) регулирующему органу (центру) можно предложить назначать цены при комплексных отклонениях водных ресурсов от их гарантированных величин по наименьшему шансу и наибольшему ущербу единицы их использования [13].

Назначение сообщаемых пользователями центру функций предпочтения, значения которых больше истинных производственных функций, может повлечь за собой увеличение значений гарантированного водопользования и связанного с этим увеличением показателей использования ресурсов в идеальных условиях. В этом случае комплексные отклонения величин поставляемых ресурсов от гарантированных значений при реализациях стохастических условий могут привести к ущербам, значительно превышающим «дополнительную» эффективность использования гарантированного водопользования. Назначение функций предпочтения, значения которых меньше истинных производственных функций, уменьшает

величины ущерба, однако при этом падает эффективность гарантированного водопользования. В обоих случаях отклонений сообщаемых функций предпочтения от истинных производственных функций риск увеличивается, Поэтому пользователям, не склонным к рискам (пользователи, представляющие собой хозяйственные субъекты, именно такие), невыгодно исказить информацию об эффективности использования водных ресурсов. Они будут сообщать центру истинные функции предпочтения. Будет решаться базовая задача.

Таким образом, при отдельном управлении количеством и качеством водных ресурсов, где базовыми являются задачи выпуклого программирования, назначение цен за водные ресурсы, соответствующее их ценности при производстве продукции, обеспечивает достижение совершенного согласования интересов водопользователей. При совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов, согласование получается приближенным, с погрешностью, определяемой точностью решения базовой многоэкстремальной задачи [13].

Рынок водных соглашений

Соглашения об использовании водных ресурсов заключаются на определенный срок, в течение которого появляются новые пользователи и прекращают работу ранее функционировавшие. Развивается производство, меняются технологии и отношение общества к использованию воды. Возникает проблема пересмотра действующих соглашений, решение которой видится в формировании управляемого рынка соглашений на использование водных ресурсов и водоотведение. Управление рынком необходимо для обеспечения интересов водопользователей, а также благополучия водной среды и окружающих территорий.

Рыночный пересмотр разрешений на использование водных ресурсов и сброс сточных вод происходит в рамках ВХС, функционирующих в стохастических условиях водопользования и водоотведения [14]. Из-за пространственной распределенности ВХС, наряду с активными участниками актов купли-продажи, непосредственно обменивающимися разрешениями, присутствуют пассивные пользователи, на эффективность функционирования которых влияют

сделки, заключаемые активными участниками рынка. Соблюдение интересов пассивных водопользователей (интересы активных пользователей не нарушаются, в противном случае сделки купли-продажи не совершаются), а также благополучия водной среды и окружающих территорий обеспечивается управляющим органом ВХС – центром.

Известно начальное распределение объёмов воды и масс примесей. Продаются и покупаются разрешения на их использование. Из-за возможных потерь воды в фрагментах сети ВХС пользователи могут получать только часть купленных водных ресурсов, величины которых определяются коэффициентами влияния продавцов на покупателей. Например, пользователь, расположенный ниже по течению реки, при покупке водных ресурсов у пользователя, расположенного выше, из-за потерь воды «по дороге» может использовать только ту часть покупки, которая дойдёт до него. И наоборот, разрешение на использование водных ресурсов, купленное у пользователя, расположенного ниже по течению, пользователем, расположенным выше, может быть использовано в большем объёме. Так как в сбросах разных пользователей содержатся различные составы примесей, то пользователь, купивший разрешение (квоту) на сброс, может воспользоваться им частично. Возможная для использования доля купленного разрешения определяется соотношениями примесей в составе сбросов продавца и покупателя.

При покупке и продаже разрешений преобразуются возможности пользователей и происходят изменения их целевых функций. Начальные квоты объёмов водных ресурсов, поступающих пользователям, и разрешённые вначале величины сбросов загрязняющих веществ заменяются новыми значениями. В целевые функции включаются доход от продажи разрешений, затраты на приобретение квот и компенсации возможных потерь у пассивных участников рынка. В процессе перераспределения разрешений на использование водных ресурсов и сброс сточных вод пользователи по отношению к различным сделкам купли-продажи могут быть одновременно продавцами, покупателями и пассивными участниками рынка.

Центр заинтересован в рациональном распределении водных ресурсов, а также в средствах для обеспечения функционирования ВХС, которые поступают в виде отчислений при совершении актов

купли-продажи. Они аккумулируются в фонде стабилизации, предназначенном для компенсации возможных потерь у пассивных участников рынка при совершении актов купли-продажи активными участниками, а также в фонде развития системы, средства которого используются для поддержания ВХС в рабочем состоянии и ее совершенствовании. Его интересы заключаются в наибольших отчислениях в эти фонды, создающие условия преобразования соперничества пользователей за водные ресурсы в их сотрудничество.

При возникновении хотя бы одной пары активных участников рынка (или нескольких активных пользователей), которые договорились об обмениваемых объемах водных ресурсов и сбросах загрязняющих веществ, а также их ценах, центр проверяет возможность таких обменов. Для этого решается задача, допустимое множество совпадает с допустимым множеством вышеописанной базовой задачи, а целевой максимизируемой функцией служит сумма отчислений в фонд стабилизации. В результате решения указанной задачи центра определяются потоки, возникающих в результате предполагаемых сделок, которые должны удовлетворять условиям допустимости распределений водных ресурсов и масс примесей. Если не существуют допустимые потоки, то пользователи корректируют свои предложения. При потоках, удовлетворяющих условиям допустимости, для пассивных участников рынка разрешений на основе решения задачи устанавливаются цены, по которым им либо компенсируется снижение эффективности использования водных ресурсов, либо они платят за повышение эффективности их использования. Средства, необходимые для компенсации потерь эффективности пассивных пользователей, формируются из отчислений, производимых активными пользователями и пассивными пользователями, эффективность функционирования которых повышается, дополненных средствами стабилизационного фонда центра.

Описанная процедура рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов характеризуется тем, что при каждой реализации стохастических условий оценки эффективности использования водных ресурсов всех пользователей – значения их производственных функций не снижаются, при этом у некоторых, в частности у активных, повышаются. Ориентиры – гарантированные

показатели количества и качества водных ресурсов, являющиеся индивидуальными переменными, в этом процессе в явном виде не участвуют. Они влияют на согласование через производственные функции, зависящие как от величин объёмов водных ресурсов и масс примесей, содержащихся в них в различных стохастических условиях, так и от значений их ориентиров.

Переход от исходных значений водных ресурсов и масс примесей к новым значениям влечёт пересмотр величин гарантированного водопользования. Осуществляется переход (при закреплённых новых значениях водных ресурсов и масс примесей) от исходных показателей гарантированного водопользования и водоотведения к новым значениям, оценивающим разрешённые объёмы водных ресурсов и массы сбросов, на которые ориентируются водопользователи. Их значения соотнесены конкретным пользователям и не связаны с другими пользователями, которые решают свои двухэтапные стохастические задачи максимизации математического ожидания эффективности использования выделенных водных ресурсов и сбросов сточных вод. Таким образом, при замене в результате рыночного обмена начального распределения разрешений на использование водных ресурсов и сброс масс примесей на преобразованные показатели оценки эффективности водопользования и водоотведения водопользователей не убывают, а у некоторых, в частности, у активных пользователей, – строго возрастают.

Замена начального распределения водных ресурсов и масс примесей на преобразованные, а также переход от начальных оценок эффективности их использования к новым оценкам, может привести к появлению пользователей, стремящихся продать и купить разрешения на использование водных ресурсов и сброс загрязняющих веществ. В этом случае описанная процедура купли-продажи повторяется. На каждом шаге этого итерационного процесса оценки эффективности пользователей, использующих водные ресурсы и сбрасывающих сточные воды, повышается. Эффективность использования водных ресурсов ограничена. Так как возрастающая ограниченная сверху последовательность имеет предел, описанный итерационный процесс рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов сходится. Таким образом, в рамках управляемого центром рынка разрешений на использование вод-

ных ресурсов и сброс сточных вод достигается согласование интересов водопользователей [14].

Согласование интересов пользователей в динамических условиях

Выше рассмотрен механизм согласования интересов пользователей, конкурирующих за использование водных объектов, в статической постановке, в которой временные особенности поступления водных ресурсов и потребностей в них в явном виде не представлены. Во многих случаях такое согласование недостаточно полно отражает специфику использования водных ресурсов из-за несоответствия сезонных вариаций стока рек и потребностей водопользования. Зачастую конфликтные ситуации создают также противоречивые требования пользователей ко времени поступления водных ресурсов. Интересы Узбекистана, Казахстана и Туркмении, расположенных в среднем и нижнем течении Сырдарьи и Амударьи – основных источников водных ресурсов Центрально-Азиатского региона, противоречат интересам Таджикистана и Киргизии, расположенных в верховьях этих рек. Таджикистан и Киргизия заинтересованы в использовании водных ресурсов для выработки электроэнергии. Для этого требуется воду накапливать летом и сбрасывать через турбины ГЭС зимой. Узбекистану, Казахстану и Туркмении вода нужна в вегетационный период: её надо накапливать зимой и использовать летом. Возникает потребность в механизмах выработки стратегий согласованного использования общих водных ресурсов в динамических условиях.

Построение механизмов согласования интересов пользователей в динамических условиях так же, как в статике, основывается на потоковом структурировании ВХС, функционирование которых рассматривается в дискретном времени. Отметим, что в отличие от большинства экономических задач в управлении водопользованием, существенно разбивать расчётный период на неравнодлительные интервалы. Например, в климатических условиях южной России вода для гидромелиорации требуется в течение примерно 3 мес. в год, для поддержания необходимых глубин для судоходства – около 5 мес., и этот интервал пересекается с «гидромелиоративным», экологические попуски производятся в течение нескольких дней. К элементам сети, соответствующей описанию функционирования

ВХС в статической постановке, добавляются находящиеся в её вершинах «склады», которые изображают водохранилища (с расположенными на них пользователями), призванные перераспределять водные ресурсы во времени. Запасы в «складах» моделируют объёмы воды и массы примесей в водохранилищах. Результат использования водных ресурсов и управления их качеством за расчётный период, оценивается функцией, представляющей собой сумму оценок экономических результатов их использования в выделенных временных промежутках.

Представление ВХС как потоковой системы предоставляет возможность интерпретировать ее в динамических условиях в виде функционирования эквивалентной потоковой системы в статических условиях [14]. Для этого исходная сеть трансформируется в расширенную сеть, которая формируется из исходной сети повторением её по числу временных сечений – концов отрезков времени, на которые разбит расчётный период. Подсети временных сечений расширенной сети, конфигурации которых совпадают с конфигурацией исходной сети, связаны дугами, моделирующими склады, и дугами с ненулевым запаздыванием в исходной сети. Каждому складу, расположенному в вершине исходной сети, в расширенной сети соответствует набор дуг, которые связывают подсети различных временных сечений. Дуги исходят из вершин подсетей и заходят в соответствующие им вершины в следующих во времени подсетях. Потоки в них моделируют объёмы воды в водохранилищах. Дугам исходной сети, моделирующим элементы ВХС с запаздыванием между моментами изъятия и возврата воды в систему, в расширенной сети соответствуют дуги, исходящие из вершин подсетей, соответствующих створам изъятия воды, и заходящие в вершины подсетей, изображающих створы возврата воды.

Сведение моделирования функционирования и выбора параметров ВХС в динамических условиях к функционированию эквивалентной системы в статических условиях, означает, что механизмы выбора параметров, формирования согласованных стратегий использования водных ресурсов и сброса сточных вод в статических условиях в равной степени пригодны и для динамических условий [14].

При согласовании интересов водопользователей в динамических условиях при выборе параметров элементов варианты водоподготовки, водопользования и водоочистки описываются взаимосвязанными булевыми переменными, которые не зависят от времени и поэтому не влияют на описанное выше преобразование исходной динамической структуры функционирования ВХС к эквивалентной статической конструкции. Поэтому механизмы согласования интересов пользователей при выборе параметров элементов в статических условиях преобразуются в механизмы выбора согласованных параметров в динамических условиях [14].

Согласование интересов водопользователей – элементов ВХС в условиях возможных изменений параметров элементов и технологий использования водных ресурсов во времени (проблема развития ВХС) отличается от проблемы выбора параметров учётом в ней этапности ввода вариантов. В модель потребовалось включить описанием возможных переходов от одних вариантов к другим. Такое описание осуществляется с применением взаимосвязанных булевых переменных, соответствующих вариантам развития, которые в этом случае зависят от времени, а также переменных, описывающих ввод и вывод вариантов водопользования [14]. Переменные ввода принимают значение 1 в момент начала функционирования соответствующего варианта, в остальные моменты времени их значения – ноль. Функции вывода равны 1 в момент окончания функционирования варианта и ноль – во все остальные моменты времени. Переменные, соответствующие реализуемым и гарантируемым объёмам воды и массам примесей, принимают значения только в своём временном отрезке из расчётного периода. Булевы переменные, соответствующие вариантам развития, а также переменные, соответствующие вводу и выводу вариантов, также заданы лишь на своих временных отрезках. Функции, оценивающие экономический результат использования водных ресурсов и управления их качеством водопользователями в течение расчётного периода, представлены в виде сумм слагаемых, каждое из которых зависит только от результатов водопользования в своём временном отрезке. Таким образом, и в этой, самой общей из ситуаций, исходная проблема согласования интересов водопользователей в динамических условиях в результате вышеописанного перехода от исходной сети к расширенной сети

заменяется эквивалентной проблемой согласования стратегий в статических условиях. Поэтому рассмотренные механизмы согласования интересов водопользователей, использующих водные объекты при выборе параметров водопользования в статических условиях, преобразуются в механизмы согласования интересов водопользователей в динамических условиях также и в условиях возможных изменений во времени параметров элементов ВХС и технологии использования водных ресурсов [14].

Комплекс моделей

Согласование интересов конкурирующих водопользователей целесообразно осуществлять с использованием описанных выше методологии и комплекса математических моделей формирования механизмов разрешения конфликтных ситуаций водопользования, с различной полнотой и подробностью учитывающих особенности эксплуатации водных ресурсов и управления их качеством. Согласование происходит поэтапно. На каждом этапе используется наиболее простые модели, отвечающие целям этапа. Это позволяет в интерактивном режиме общения центра и пользователей оценивать исходные данные, осмысливать вносимые упрощения, анализировать получаемые решения и, при необходимости преобразовывать модели. Согласование начинается с применения простейшей модели и затем, по мере необходимости, осуществляется переход к моделям, более полно отражающим особенности использования водных ресурсов и управления их качеством. Предлагается 7-этапная процедура последовательного уточнения вырабатываемых компромиссных стратегий, с вовлечением доступной информации, которая на длительную перспективу не может быть ни полной, ни точной [14].

Вначале, на первом этапе, ВХС структурируется в виде веерной схемы – весьма частного случая сети. Все водные ресурсы системы за весь расчётный период сосредоточиваются в одной вершине, изображающей источник водных ресурсов. Из него элементы ВХС – водопользователи получают по мере возможности необходимую им воду. Все располагаемые водные ресурсы без учёта качества собираются в ресурс, объём которого соответствует совокупному ресурсу, и помещаются в вершину, изображающую источник. Элементы ВХС формируют спрос на водные ресурсы и оценивают результат

использования водных ресурсов в виде производственных функций, описанных выше. В рассматриваемой на первом этапе модели А согласования интересов водопользователей максимизируется математическое ожидание суммарного результата использования водных ресурсов ВХС. Для решения задачи, описывающей модель, так же как для всех задач последующих всех этапов, естественно применить метод групповой координатной оптимизации [20]. В нём последовательно отыскивается оптимум по группам системных переменных – реальных объёмов водных ресурсов, которыми распоряжается центр (ВХС), и индивидуальных переменных, которые принадлежат пользователям, – ориентировочных значений объёмов водных ресурсов. Это даёт возможность наблюдать и оценивать последовательные приближения к оптимальному решению и при необходимости переосмысливать проблему.

Поиск компромисса между требованиями элементов ВХС и возможностями их выполнения показывает, существует ли хотя бы гипотетическая возможность удовлетворить их запросы. Если обнаруживается отсутствие решения, то пересматриваются экзогенные параметры модели, в частности, требования пользователей. Если решение существует, то пользователи проводят анализ полученного решения, в котором участвуют: стоимостные оценки водных ресурсов и их ориентировочных величин, риски и шансы. При положительной оценке достигнутого результата осуществляется переход ко второму этапу, в котором согласование интересов пользователей осуществляется на основе решений, получаемых в математической модели, описывающей пространственное распределение объёмов воды и масс примесей. В противном случае модель пересматривается и формируется новая задача первого этапа.

Модели, рассматриваемые на 2–6 этапах, представлены базовыми задачами, описанные выше. Во всех случаях при отсутствии допустимого вектора задачи и/или при неудовлетворённости пользователей её решением, задача пересматривается. Если при корректировке модели не удастся достичь положительного результата, то осуществляется возврат на предыдущий этап. При положительной оценке результата следует переход к следующему этапу. Модель второго этапа G_2 представлена задачей оптимального использования водных ресурсов и управление их качеством в статической пос-

тановке. Её подмодели D_2 и E_2 характеризуют использования водных ресурсов и управление их качеством порознь. На третьем этапе в модели G_3 осуществляется выбор параметров пользователей и ВХС при совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов в статической постановке. Её подмодели D_3 и E_3 описывают выбор параметров пользователей при раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов. На четвёртом этапе с использованием модели G_4 происходит согласование стратегий использования водных ресурсов и управления их качеством в динамике, её частные случаи – её подмодели D_4 и E_4 описывают согласование стратегий при раздельном использовании водных ресурсов и управлении их качеством. Модель пятого этапа G_5 представлена задачей определения оптимальных параметров элементов ВХС при совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов в динамической постановке, которая включает как частные случаи подмодели D_5 и E_5 , описывающие выбор параметров при раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов. На шестом этапе с использованием модели G_6 осуществляется выбор поэтапно вводимых параметров при совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов в динамической постановке. При раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов в выборе параметров используются её подмодели D_6 и E_6 .

На седьмом этапе согласованные стратегии использования водных ресурсов и управления их качеством, а также параметры ВХС и пользователей, определённые на предыдущих этапах в оптимизационных моделях, уточняются с использованием имитационных моделей. В имитационных моделях, воспроизводящих процесс функционирования, ВХС также изображается сетью с перемещающимися по ней потоками, соответствующими потокам воды и примесей в системе, целевые функции в явном виде отсутствуют. Появляется возможность со значительно большей подробностью представить параметры и процессы, не учтённые в моделях оптимизации, рассмотренных на предыдущих этапах, в частности, структурировать ВХС в виде сети, более подробно отражающей взаимосвязи элементов, чем в моделях предыдущих этапов. Также можно более подробно представить динамические особенности использования водных ресурсов и множество реализаций стохастических

условий. Известны различные имитационные модели, описывающие процесс функционирования ВХС: балансовые [24], узловые [7], камерные [26], синтетические [15], агрегативные [18] и другие. В зависимости от особенностей ВХС согласование стратегий пользователей может потребовать применения нескольких имитационных моделей, отражающих различные аспекты водопользования.

Вариантные расчёты с использованием имитационных моделей проводятся индивидуально для каждой реализации стохастических условий при фиксированных значениях параметров элементов ВХС, а также гарантированных показателей водоподготовки, водопользования и водоочистки, которые также можно представить в более подробной форме. В результате серии вариантных расчётов центр совместно с пользователями, руководствуясь в основном неформальными соображениями о предпочтительных режимах, выбирают рациональный вариант функционирования ВХС. Если в результате серии имитационных экспериментов удастся найти приемлемое решение, процесс выработки согласованных стратегий использования водных ресурсов и управления их качеством можно полагать завершённым. В противном случае осуществляется возврат к модели шестого этапа, которая трансформируется в соответствии с неувязками, выявленными на седьмом этапе.

Описанную выше взаимосвязь этапов выработки стратегии согласования интересов трансграничных водопользователей иллюстрирует блок-схема взаимодействия моделей, представленная на рис. Блоки представляют модели: (1) – простейшая веерная модель первого этапа A , (2) – модель управления в статической постановке G_2 (её подмодели D_2 и E_2), (3) – модель выбора параметров статической постановке G_3 (её подмодели D_3 и E_3), (4) – модель управления в динамике при закрепленных параметрах G_4 (её подмодели D_4 и E_4), (5) – модель выбора параметров в динамических условиях G_5 (её подмодели D_5 и E_5), (6) – модель развития ВХС, учитывающая этапность ввода параметров в динамике G_6 (её подмодели D_6 и E_6), имитационная модель G_7 .

При согласовании интересов водопользователей на основе рассмотренного многоэтапного комплекса математических моделей, последовательно уточняющих решения, где стратегии сравниваются, отбраковываются и выбираются рациональные, может потребо-

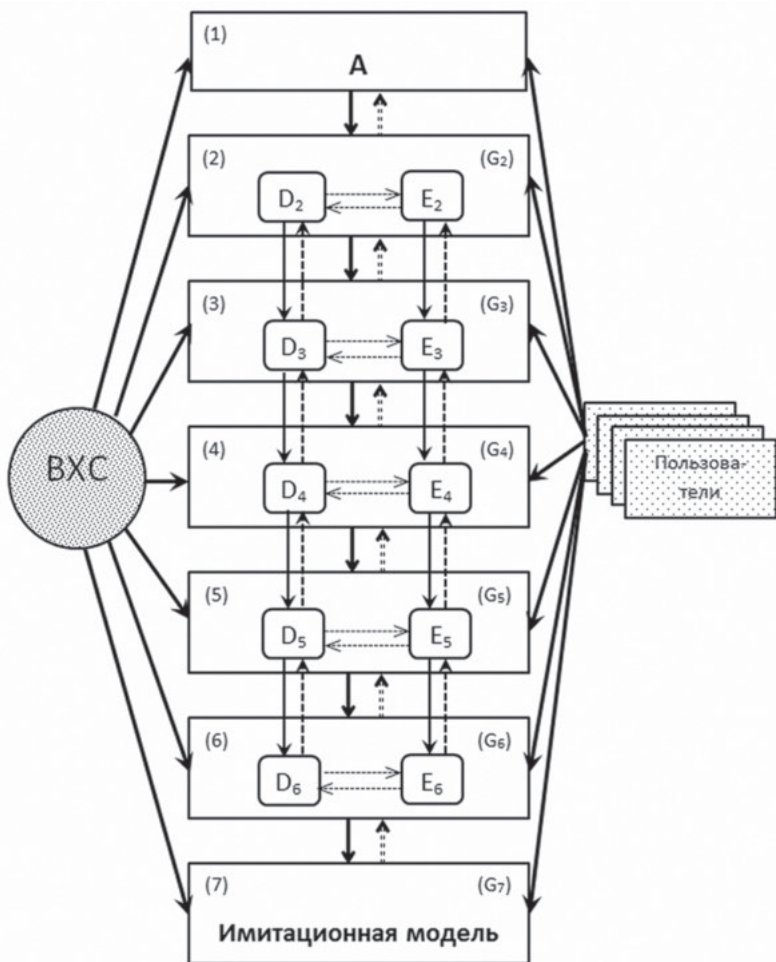


Рис. Блок схема взаимодействия моделей

ваться его модификация. Допускается изменение состава моделей и их структуры, часть из предложенных моделей может быть исключена из рассмотренной системы, что несколько не изменяет общую «идеологию» их взаимодействия. Это положение остаётся справедливым, если комплекс моделей дополняется иными моделями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Э.Ф., Данилов-Данильян В.И., Завельский М.Г. Проблемы разработки системы оптимального планирования народного хозяйства. М.: ЦЭМИ АН СССР, 1970. 126 с.
2. Бончковский Н.Ф., Кузин А.К. К вопросу совершенствования правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами // Водные ресурсы. 1986. №3. С. 22–30.
3. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. 255 с
4. Бурков В.Н., Лернер А.Я. Принцип открытого управления активными системами. М.: Ин-т проблем управления, 1971. 26 с.
5. Ватель И.А., Ерешко Ф.И. Математика конфликта и сотрудничества. М.: Знание, 1973. 64с
6. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач М.: Наука, 1981, 400 с.
7. Воропаев Г.В. Резервы ирригации, связанные с оптимизацией использования водных ресурсов // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. М.: Наука. 1973. С. 151–179.
8. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами (Теория принятия решений при неполном единстве). М.: Издательство МГУ, 1972, 183 с.
- 9 Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. 327 с.
10. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Водохозяйственные системы в условиях неопределённости (методология управления природно-техническим комплексом) // Инженерная экология, 2010, №6 (96), С. 27–45.
11. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Водохозяйственные системы как иерархические системы согласования стратегий водопользования // Инженерная экология, 2011, №3, С. 3–23.
12. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Производственные функции в условиях неопределённости // Экономика и математические методы. 2007. Т. 43. №1. С. 16–26.
13. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Механизм разрешения конфликтных ситуаций в условиях несовершенной конкуренции // Известия РАН. Теория и системы управления, 2016, №3, С. 163–173.
14. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Согласование стратегий трансграничного водопользования. М: Энциклопедия, 2016а, 216 с.
15. Жданов А.Ю., Горстко А.Б. Математическая модель рационального использования водных ресурсов Азовского бассейна // Водные ресурсы. 1975. №3. С. 188–192.
16. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока на основе теории вероятностей // Труды ВИСУ, Гидротехнический сборник. 1932. №4. С. 7–31.

17. Лазебник А.И., Хранович И.Л., Цаллагова О.Н. Обобщенные сепарабельные задачи и их приложения // Автоматика и телемеханика. 1981. №8. С. 107–118.

18. Немчинов Б.В., Шнайдман В.М. Агрегативная модель региональной водохозяйственной системы // Теория сложных систем и методы моделирования. М.: ВНИИСИ. 1983. С. 113–124.

19. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука. 1983. 384 с.

20. Райков Л.Д. Вопросы построения и применения АВМ для многовариантных задач. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МИЭМ, 1966. 239 с.

21. Bertrand J. Book review of *theorie mathematiques de la richesse sociale* and of *recherches sur les principes mathematiques de la theorie des richesses* // J. Savants. 1883. V. 67. P. 499–508.

22. Cournot A. *Recherches sur les principes mathematiques de la theorie des richesses*. Paris: L. Hachette, 1838. 198 p.

23. Hazen A. The storage to be provided in impounding reservoirs for Municipal water supply // Trans. ASCE. 1914. V. 77. P. 1539–1659.

24. Sigvaldason O. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system // Water Resour. Res. 1976. V. 12. №2. P. 263–278.

25. Stackelberg H. *Marktform und Gleichgewicht*. Vien; Berlin: Verlag von J. Springer, 1934. 469 p.

26. Thoman R.V. Mathematical model for dissolved oxygen // J. Sanit. Eng. Div. ASCE. 1963. V. 89. №5. P. 1–30.

Изучение и оценка подземного стока и ресурсов пресных подземных вод как основы их рационального использования и охраны

Р.Г. Джамалов

Первым научным руководителем и организатором гидрогеологических исследований в Институте водных проблем со дня его основания был известный ученый, профессор Б.И. Куделин. Он заложил основную направленность исследований подземных вод как элемента водного баланса и компонента окружающей среды. Среди всего многообразия возможных задач приоритет был отдан подземному стоку, оценке ресурсов, режима и баланса подземных вод. Такая направленность исследований представляется оправданной и обоснованной в Институте водных проблем при комплексном изучении вод суши в их единстве и взаимодействии.

Направления исследований в области гидрогеологии в ИВП до 2000 г.

Среди основных направлений исследований и их результатов можно выделить: изучение особенностей формирования и оценка подземного стока и естественных ресурсов подземных вод; исследование подземного водообмена суши и моря и оценка подземного стока в моря и океаны; исследования режима подземных вод и его прогнозы; изучение процессов формирования качества подземных вод в различных условиях и оценка их защищённости от загрязнения.

Исследования подземного стока и естественных (возобновляемых) ресурсов подземных вод проводились с первых же дней создания ИВП. Большим коллективом гидрогеологов, гидрологов, водохозяйственников и изыскателей различных организаций страны (МГУ, ГТИ, ВСЕГИНГЕО, Геологических управлений регионов и др.) под научно-методическим руководством сотрудников Института (Куделин, И.С. Зекцер, Р.Г. Джамалов, Н.А. Лебедева), выполнены работы по оценке подземного стока территории бывшего СССР и составлена Карта подземного стока территории СССР в масштабе 1:2 500 000, опубликованная в 1974 г. За последующие годы составлены более детальные карты подземного стока и естественных ресурсов подземных вод некоторых крупных артезианских бассейнов страны

(Прибалтийского – Зекцер, Московского – Лебедева, Терско-Кумского – Джамалов, Азово-Кубанского – И.В. Диордиев), отражающие основные особенности их формирования в различных природных условиях.

Выполненные региональные оценки основаны на анализе и обработке уже имеющихся гидрологических и гидрогеологических материалов без проведения специальных дорогостоящих разведочных работ, что определяет их экономическую эффективность. Количественные удельные и относительные показатели подземного стока и возобновляемых ресурсов подземных вод придали уже традиционным гидрогеологическим картам принципиально новое содержание и определили их востребованность при инженерных оценках и прогнозных расчётах.

Проведение впервые в мире таких крупных пространственно-временных обобщений позволило выявить основные региональные закономерности формирования и распределения среднегодовых и минимальных модулей и коэффициентов подземного стока в различных природных условиях и установить их связь с общей природной зональностью. На основе статистического анализа и методов моделирования рассмотрено влияние на подземный сток таких региональных факторов, как мощность и состав пород зоны аэрации, эрозионной расчленённости и фильтрационных свойств водоносных горизонтов. Статистическими методами показаны тенденции многолетней цикличности подземного стока [10; 14].

Данные о подземном стоке легли в основу расчётов выноса растворённых веществ подземными водами (ионный подземный сток) и их денудационной деятельности. Показано, что ионный подземный сток превышает величину выноса растворённых веществ поверхностным стоком. Под влиянием этого выноса в естественных условиях за тысячелетия происходит снижение земной поверхности, и этот процесс значительно активизируется при интенсивной эксплуатации подземных вод. Величины подземного стока и их распределение по территории позволяют количественно оценить темпы и сроки водообмена подземных вод, что принципиально при оценке перспектив использования водных ресурсов, особенно при условии их дефицита, в отдельных регионах.

Опыт российских специалистов по региональной оценке и картированию подземного стока и естественных ресурсов подземных вод получил международное признание. В соответствии с решением Национальных комитетов по Международной гидрологической программе ЮНЕСКО в начале 1980-х гг. выполнены работы по оценке и картированию подземного стока территории Центральной и Восточной Европы. Впервые в истории подобных исследований составлена и издана довольно детальная международная карта подземного стока Центральной и Восточной Европы масштаба 1:1 500 000 и монография «Подземный сток Центральной и Восточной Европы» [22], которые до сих пор не имеют аналогов.

Плодотворное сотрудничество гидрогеологов ИВП со специалистами различных стран под эгидой ЮНЕСКО продолжалось и в последующие годы. В соответствии с решением ЮНЕСКО по Международной гидрологической программе гидрогеологами ИВП выполнены исследования по Международному проекту «Роль подземных вод в гидрологическом цикле и континентальном водном балансе» (Зекцер, Джамалов, Т.И. Сафронова, Диордиев). В результате составлен и опубликован в ЮНЕСКО 1988 г. доклад по этой проблеме [25; 24].

Основным результатом исследований по международному проекту ЮНЕСКО является Карта гидрогеологических условий и подземного стока Мира в масштабе 1:10 000 000. Она составлена по заданию ЮНЕСКО и опубликована в 1999 г. в США. [26; 20]. Методика работ, легенда, и основное содержание Карты разработаны специалистами Института водных проблем РАН под научно-методическим руководством и непосредственным участием Джамалова, Зекцера, Сафроновой, Диордиева, Лебедевой, Л.П. Новосёловой и др. Карта прошла редактирование международной редколлекцией из ведущих специалистов Австралии, Аргентины, Бразилии, Германии, США, Индии, Франции, Италии, Китая, Индонезии и др. стран. Она рекомендована для широкого использования в научных и учебных целях. Карта представляет собой специальную тематическую гидрогеологическую карту, основным содержанием которой является распределение количественных характеристик подземного стока, а также геологических и гидрогеологических условий формирования подземных вод.

На Карте помимо водовмещающих пород и их литологического состава, отражается специальная информация о распределении по площади количественных характеристик подземного стока: его модулей и коэффициентов. Совмещенное картографическое изображение двух указанных количественных характеристик, существенно увеличивающее информативность карты. Кроме того, на Карте отражены также особые условия формирования подземного стока, связанные с активным воздействием инженерной деятельности человека, участками поглощения поверхностного стока в руслах рек, с рифтовыми зонами, региональными разломами и т.д.

Карта впервые в практике регионального гидрогеологического картирования отражает условия разгрузки подземных вод в моря и океаны с количественной характеристикой этого процесса в моря и океаны со всех континентов и островов в модулях субмаринного подземного стока в пределах наиболее изученной части акватории – шельфа.

Таким образом, основное содержание Карты – конкретная количественная информация, которая позволяет решать важные региональные задачи: определения величин подземного стока и естественных ресурсов подземных вод для планирования комплексного использования и охраны водных ресурсов; определения величин восполнения (питания) подземных вод для оценки их роли в общих водных ресурсах и водном балансе отдельных территорий, бассейнов морей и крупных рек; определения роли естественных ресурсов подземных вод в их эксплуатируемых запасах для отдельных экономических и административных районов; определения подземной составляющей общего речного стока и прогнозирования изменений в речном стоке под влиянием крупномасштабного отбора подземных вод; определения величин непосредственного (прямого) подземного стока в моря и океаны для оценки роли подземных вод в водном и солевом балансе морей. Карта служит основой для широких исследований в области гидрогеологии, гидрологии, условий и закономерностей формирования водных ресурсов и водного баланса, для глобальных гидролого-гидрогеологических обобщений и смежных видов деятельности. Уникальность ее заключается в том, что она позволяет вскрыть, обосновать и проследить основные закономерности формирования подземного стока в глобальном масш-

табе. Разработанная авторами своеобразная легенда Карты наглядно подчёркивает естественно-историческую связь величин подземного стока с физико-географической зональностью, структурно-тектоническими условиями и литологическим составом водовмещающих пород, которая нарушается или затухивается в последние годы таким ведущим азональным фактором, как хозяйственная деятельность.

Карта гидрогеологических условий и подземного стока Мира как крупное научное исследование удостоена в 2001 г. Российской академией наук специальной премии имени академика Ф.П. Саваренского.

Наряду с региональными исследованиями подземного стока и ресурсов подземных вод проводились работы по разработке математических моделей водоносных систем. Основные теоретические подходы для постановки региональных задач по геофильтрации и алгоритмы их модельного решения рассмотрены в монографии Н.А. Огилви 1974 г. «Физические и геологические поля в гидрогеологии». Особое внимание в этой работе уделено применению метода конечных элементов для расчёта неустановившейся фильтрации подземных вод в сложных геолого-гидрогеологических условиях.

Значительное развитие в эти годы получили методические подходы применения дистанционных методов в исследованиях подземного стока [9]. Целенаправленное дешифрирование космических снимков в различных спектрах позволяет не только выделить гидрогеологические структуры, но и охарактеризовать их водообильность и качественно оценить масштабы подземного стока и ресурсов подземных вод (Джамалов, Ю.Л. Обьедков).

В эти же годы Зекцером и Лебедевой с участием специалистов ГПИ была составлена и опубликована карта водного баланса территории бывшего СССР в масштабе 1:7 500 000, на которой впервые показаны элементы водного баланса (осадки, испарение, речной сток и подземный сток), определённые независимыми друг от друга.

Выполненные в 1970–80-е гг. исследования М.Р. Никитина, Н.П. Ахметьевой по использованию ресурсов солоноватых и солёных подземных вод показали, что такие воды в южных регионах бывшего СССР на площади 3,6 млн. км² составляют около 30 км³/год, что почти в 1,5 раза превышает ресурсы пресных подземных вод этих террито-

рий. Подземные воды повышенной минерализации (1–35 г/л) представляют важный резерв хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, орошения и обводнения сельскохозяйственных земель. Они могут использоваться как химическое сырьё, так и для питьевого водоснабжения и орошения после искусственного опреснения. Итогом этих работ, помимо карт различного масштаба явилась, книга «Ресурсы соленых и солёных подземных вод СССР», опубликованная в 1978 г.

Исследования процессов подземного водообмена суши и моря, оценка подземного стока в моря и океаны проводились гидрогеологами ИВП для обоснования отдельных составляющих общего водного баланса и уточнения отдельных аспектов круговорота воды. Без сведений о подземном стоке водный баланс отдельных морей и крупных озёр, а также мировой водный баланс остались незамкнутыми. Приоритет в постановке и развитие широкомасштабных исследований подземного стока в моря в нашей стране и за рубежом принадлежат подразделениям гидрогеологии ИВП. Первые работы в этом направлении были посвящены оценке подземной составляющей водного баланса Ладожского озера и Каспийского моря. В литературе неоднократно отмечалось научное и практическое значение изучения подземного стока и процессов подземного водообмена суши и моря, среди которых приоритетными могут служить: изучение роли подземного стока в общем водном балансе Земли и глобальном круговороте воды, оценка влияния подземных вод на формирование водного и солевого балансов морей и крупных озёр, изучение взаимодействия морских и подземных вод в прибрежных районах, изучение областей разгрузки пресных подземных вод в прибрежных зонах морей с целью их использования для водоснабжения, изучение влияния подземных вод на формирование месторождений полезных ископаемых на дне морей и океанов и роли субмаринного подземного стока в геологических процессах [8; 11].

Под руководством и при непосредственном участии Р.Г. Джамалова в ИВП выполнены исследования подземной составляющей Мирового водного баланса, в результате которых удалось получить дифференцированные оценки подземного стока по отдельным морям и континентам, оценить вынос солей подземными водами и установить общие закономерности формирования и распределения

подземного стока в моря в различных геолого-гидрогеологических и физико-географических условиях. Выполненные исследования являются дальнейшим развитием учения о подземном стоке [7; 27].

Разработана, апробирована и внедрена методика гидрогеологических исследований акваторий морей и крупных озёр, основанная на сочетании гидродинамических методов расчёта подземного притока и натурных экспериментальных работ по изучению процессов разгрузки подземных вод на дне водоёмов (А.В. Месхетели, Зекцер, Джамалов, В.А. Друшиц, Л.М. Тынкова). Впервые создан так называемый морской гидрогеологический комплекс, который по аномалиям температуры и солёности придонного слоя воды, в сочетании с сейсмоакустическим профилированием позволяет количественно оценить приток подземных вод на отдельных участках акватории озёр и морей. Наиболее детальные работы по оценке субмаринного стока проведены по Каспийскому морю (Месхетели, Джамалов, Зекцер). В результате получены оценки подземного водного и солевого притока по отдельным участкам побережья, выделены участки акватории с наиболее интенсивной разгрузкой подземных вод, оценена роль подземных вод в водном и солевом балансах. В последующие годы работы аналогичного характера проведены для отдельных участков береговой зоны Чёрного моря, озёр Иссык-Куль и Балхаш (Месхетели, Д.В. Кузнецов, Друшиц, Г.М. Бертельсон).

Следует особо отметить, что в целом выполненные исследования подземного стока в моря и океаны послужили основой для формирования и становления новой отрасли знаний в области наук о Земле – морской гидрогеологии, тесно связанной с морской геологией, гидрогеологией суши, океанологией и рядом других наук. Предложена понятийная система основных терминов и определений морской гидрогеологии, разработаны методы её исследований, обоснована концептуальная модель взаимодействия подземных вод суши, субмаринных и морских вод.

Установлено, что распределение подземного стока в Мировой океан в глобальном масштабе подчиняется широтной физико-географической зональности, обуславливающей постепенное увеличение удельных значений субмаринного стока от субарктических районов до умеренной зоны, резкое их возрастание во влажных субтропиках и тропиках и снижение в полуаридных и аридных райо-

нах. Местные орографические, геолого-структурные и гидрогеологические особенности прибрежных водосборных площадей усложняют эту общую картину распределения значений субмаринного стока, не нарушая её в целом.

Субмаринный ионный сток существенно влияет на солевой и гидробиологический режим прибрежных частей морей и океанов, процессы биогенного осадконакопления и формирование месторождений полезных ископаемых. Установленная существенная роль поступления солей с подземными водами в Мировой океан (52% привноса солей реками) вносит кардинальные изменения в сложившееся представление о том, что первичная биопродукция океанов и масштабы биогенного осадконакопления лимитируются поступлением солей только с речным стоком.

Интенсивность отжатия субмаринных седиментационных вод при уплотнении осадков контролируется скоростью седиментации и особенностями тектонического строения дна Мирового океана. В связи с этим максимальные удельные и суммарные величины отжимающихся вод наблюдаются в периферийных частях океанов и вдоль срединно-океанических хребтов. Следовательно, закономерное распределение в пределах Мирового океана зон различной интенсивности отжатия седиментационных вод обусловлено взаимодействием циркумконтинентальной, физико-географической и тектонической зональностей.

Региональная количественная оценка подземного водообмена суши и моря позволила замкнуть мировой водный баланс и балансы отдельных морей и озёр и уточнить роль субмаринных подземных вод при решении региональных и глобальных гидролого-гидрогеологических и водохозяйственных проблем. На основании полученных результатов составлены Карта подземного стока в Мировой океан и рассмотренная выше Карта гидрогеологических условий и подземного стока Мира.

Таким образом, полученные значения подземного водообмена суши и моря, основные закономерности этого природного процесса служат основой научного прогноза и изучения условий формирования подземного стока Земли.

Исследования пространственно-временных особенностей формирования режима подземных вод и разработка методических

основ его прогноза проводились под руководством В.С. Ковалевско-го и были направлены на познание процессов и особенностей изменчивости режима под воздействием природных и антропогенных факторов как основы его прогноза и обоснования рационального использования подземных вод и их охраны.

На массовом материале многолетних наблюдениях за режимом подземных вод бывшего СССР и других стран установлены количественные взаимосвязи с изменениями атмосферной циркуляции, серией метеорологических факторов (атмосферными осадками, температурами воздуха, атмосферным давлением, дефицитом влажности воздуха и др.), с гидрологическими и биологическими факторами. В том числе установлены зависимости процессов питания и разгрузки подземных вод от глубин залегания их уровней, характера их сезонного и многолетнего режима. Исследованы проявления квазицикличности в колебаниях уровней подземных вод при чередовании серий маловодных и многоводных лет, региональной и глобальной синхронности и асинхронности режима уровней подземных вод и подземного стока, наличие многолетних линейных и нелинейных трендов, оценена их статистическая значимость. Установлен ряд закономерностей режима подземных вод: его широтная и вертикальная зональность, зависимость амплитуд колебаний уровней и степени инерционности подземных вод от глубин их залегания, фильтрационных и ёмкостных свойств водовмещающих пород и др. Определена и охарактеризована роль различных режимообразующих факторов и условий (климатических, геологических и др.) в формировании режима подземных вод. Итоги этих исследований изложены в монографиях [17; 14; 15].

Исследованные взаимосвязи режима подземных вод с различными режимообразующими факторами, позволили разработать методологию прогнозирования режима уровней подземных вод с различной заблаговременностью. Для каждого региона России установлены предикторы для прогноза основных экстремальных и среднегодовых значений уровней подземных вод с определением оптимальной заблаговременности, достоверности и точности прогнозов, а также сформулировать рекомендации по их составлению. Показана принципиальная возможность составления прогнозов значений уровней и расходов подземных вод с заблаговременно-

стью в 3–6 месяцев при ряде исходных данных [16]. Многолетняя практика составления таких прогнозов показала вполне удовлетворительную их оправдываемость, отвечающую запросам потребителей. Разработаны также методы анализа режима подземных вод как на участках их разведки для водоснабжения, так и на действующих водозаборах [12; 13; 20].

Изучение взаимосвязи между режимом подземных вод и метеорологическими факторами позволили дать оценку возможной изменчивости естественных ресурсов подземных вод и подземного питания рек по бассейну Волги в связи с прогнозируемым изменением климата. Эти исследования показали, что трансформация климата неизбежно скажется на уровнях и расходах подземных вод. В первой четверти 21 в. эти изменения возрастут до 20–40%, т. е. проявятся в виде направленного тренда в сторону увеличения расходов подземных вод. Связано это будет с более тёплыми зимами и увеличением тем самым более растянутого во времени зимне-весеннего питания подземных вод. Подобные ожидаемые изменения в ресурсах подземных вод улучшат условия водоснабжения, т. к. приведут к повышению меженных расходов рек. С другой стороны, следует ожидать увеличения площадей переувлажненных и заболоченных земель, степени подтопленности городов, активизации оползневых, карстово-суффозионных процессов, ухудшения медико-биологической обстановки и др. [14; 19]. Данные прогнозы в определённой степени оказались оправданными, о чем свидетельствуют современные исследования режима и ресурсов подземных вод в лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды ИВП и других родственных организациях.

Установленные законы распределения питания подземных вод и статистические параметры этого процесса позволяют рассчитать методом Монте-Карло вероятные колебания питания подземных вод заданной обеспеченности на расчётный (прогнозный) период. В прогнозные расчёты запасов подземных вод в моделях следует учитывать такие колебания питания в зависимости от водности лет, а не среднемноголетнее его значение, что приблизит такой расчёт к реальности и повысит его достоверность. Алгоритм таких оценок для различных законов распределения уровней или питания подземных вод разработан Ковалевским и Тынковой [18].

В связи с тем, что подземные воды являются компонентом окружающей среды, необходимо учитывать интенсивные техногенные нарушения гидрогеологических условий, которые проявляются во взаимосвязанных с ними других компонентах среды. Так, изучение и физическое обоснование подтопления земель, активизации оползней и просадочных явлений, активизации карстово-суффозионных процессов, ущерба речному стоку, ухудшения экологической обстановки и т.д. позволило разработать принципы эколого-гидрогеологического районирования территорий в различных масштабах. В основу такого районирования положены типизация режима подземных вод по условиям его формирования в естественных условиях, а также по степени и характеру нарушенности взаимосвязанной с подземными водами окружающей среды. По этим принципам составлена первая карта эколого-гидрогеологического районирования РФ. Цель такого районирования – обоснование оптимального и целенаправленного мониторинга подземных вод и взаимосвязанных с ними компонентов окружающей среды, а также программ наблюдений на них. При обосновании размещения сетей мониторинга подземных вод, принималась во внимание необходимость получения по её данным требуемой исходной информации для прогноза режима подземных вод в естественных и нарушенных условиях.

Изучение процессов и закономерностей формирования качества подземных вод в различных условиях и оценка их защищённости от загрязнения проводятся в ИВП в нескольких направлениях: изучение процессов загрязнения подземных вод под влиянием кислых атмосферных выпадений, сельскохозяйственных удобрений и радиоактивных источников; разработка математических моделей миграции и трансформации загрязняющих веществ в насыщенной и ненасыщенной зонах, а также методики региональной оценки и картирования естественной защищённости подземных вод. Натурные и экспериментальные работы по региональной оценке и детальному изучению влияния антропогенной нагрузки на качество подземных вод уже в течение многих лет проводятся в центральных районах Европейской части России. В частности, многолетние исследования в Московском регионе позволили установить, что в условиях интенсивной техногенной нагрузки на окружающую среду формируются новые дополнительные очаги питания и загрязнения

подземных вод, что приводит к резкому сокращению темпов водообмена (до 2–5 лет вместо 100) в эксплуатируемых водоносных горизонтах и увеличению концентраций основных солей и микроэлементов. Существенное изменение гидрогеологических условий вызывает в отдельных районах активизацию карстово-суффозионных процессов, скорость которых в 50–100 раз превышает их естественную интенсивность [12].

Изучение снегового покрова, поверхностных, почвенных и грунтовых вод в центральных и северо-западных районах Европейской части РФ позволило установить региональное воздействие кислых атмосферных выпадений на формирование современного гидрогеохимического режима подземных и поверхностных вод. В результате установлено, что на огромных территориях северо-западных регионов РФ и прилегающих стран произошла смена естественного гидрокарбонатного состава грунтовых вод на сульфатный, а величина рН в отдельных случаях снижается до 4,5–5. При таком закислении грунтовых и почвенных вод создаются благоприятные условия для миграции тяжёлых металлов и их поступления в водоносные горизонты. В связи с тем, что эти процессы имеют региональный характер, основное внимание во всём мире уделяется оценке буферных (нейтрализующих) свойств почв и пород зоны аэрации в целом. Наши исследования в этой области позволяют предложить для оценки этих свойств соотношение между ионами сульфата кальция и магния. Этот показатель позволяет судить о наличии и направленности процессов закисления природных вод даже при постоянных значениях рН.

Загрязнение грунтовых вод органическими и минеральными удобрениями изучалось на примере водоохранной зоны Ивановского водохранилища. Основная задача – оценка загрязнений биогенными веществами почвенных и грунтовых вод, а также их вынос с подземным стоком в водохранилище. При решении этих задач рассматривалось влияние сорбции и десорбции, нитрификации и денитрификации на интенсивность проникновения нитратов, аммония, фосфора и калия до уровня грунтовых вод. Установлено, что основным компонентом загрязнения грунтовых вод служат нитраты, миграционная способность которых существенно зависит от количества органического вещества в почвах, их кислотности и песчаности. На примере водоохранной зоны Ивановского водо-

хранилища показано, что поступление азота в водохранилище с грунтовым стоком превышает его вынос с поверхностным [6].

Учитывая большую опасность и региональный характер радиоактивного загрязнения природной среды, большое внимание в исследованиях ИВП уделено разработке концепции радиологического мониторинга гидросферы (МГС) [17]. Актуальность этой проблемы обусловлена всё более увеличивающейся техногенной нагрузкой на природную среду, в связи с чем подземные воды нередко становятся наиболее защищённым компонентом среды и источником водоснабжения.

В последние годы значительное место в исследованиях принадлежит разработке и применению математических моделей для оценки и прогноза изменения качества подземных вод под влиянием различных источников загрязнения. При этом приоритетными служат модели, которые позволяют описывать перенос и трансформацию загрязняющих веществ как в зоне аэрации, так и в насыщенном потоке с учётом проявления защитных свойств водовмещающих пород и других компонентов системы.

Основной особенностью разрабатываемого подхода является возможность учёта в моделях неоднородности пространственного распределения фильтрационных и литолого-геохимических характеристик системы. Совместное влияние этих факторов может быть определяющим при формировании ареала загрязнения в гидрогеологической системе. Включение их в модель позволяет повысить точность прогнозной оценки времени защищённости подземных вод как фактор времени появления загрязняющего вещества в опасных концентрациях на охраняемом объекте. Данная модель позволяет оценить не только время появления загрязнения для некоторых средних природных условий, но и вероятность быстрого прорыва в связи со случайным пространственным распределением фильтрационных параметров среды.

Существующие методики региональной оценки защищённости подземных вод основаны главным образом на качественном или полуколичественном учёте различных факторов, определяющих условия существования водоносной системы в пространстве и во времени (DRASTIC, GOT и т. д.). В связи с этим указанные подходы отличаются существенной неопределённостью, дают качественное пред-

ставление о степени уязвимости подземных вод и их ресурсов и не обеспечивают возможность обоснованных прогнозных оценок. В связи с этим предлагается методика оценки защищённости подземных вод, исходя из действительной скорости поступления консервативных загрязнений в водоносный горизонт или до защищаемого объекта. Указанная методика позволяет оценить время поступления загрязняющих веществ в заданной концентрации в расчётную точку при различных условиях в зависимости от мощности и литологического состава пород зоны аэрации, а также фильтрационных характеристик эксплуатируемого водоносного горизонта. При этом скорость продвижения фронта загрязнения или время достижения расчётной точки оценивается в терминах вероятностей с учётом степени неопределённости в исходной информации о системе.

Авария на Чернобыльской АЭС показала, что подземные воды уязвимы к радиоактивному загрязнению. В связи с этим разработана методика оценки естественной защищённости подземных вод от радиоактивного загрязнения. При этом показано, что естественная защищённость подземных вод к этому виду загрязнения имеет свою особенность, обусловленную тем, что именно почвы, как наиболее активный слой зоны аэрации, способны связать большее количество радионуклидов. В связи с этим предлагается верхнюю защитную зону, отделяющую подземные воды от поверхностного загрязнения рассматривать как двухъярусную систему: первый слой – почвы, второй – породы зоны аэрации. Для оценки и картирования защищённости предлагается расчётное уравнение времени миграции загрязняющего вещества через защитную зону, учитывающее движение фронта инфильтрационных вод и задержку – сорбцию загрязняющего вещества породой, что по существу соответствует предварительному прогнозу миграции загрязнения. По разработанной методике А. П. Белоусовой проведена оценка защищённости и уязвимости грунтовых вод от радиоактивного загрязнения в Брянской, Тульской и Калужской областях [3; 5].

Направления исследований в области гидрогеологии после 2000 г.

Рассмотренные выше направления получили развитие с учётом произошедших в стране и мире природно-климатических и социально-экономических изменений.

Оценка многолетних изменений подземного стока и ресурсов подземных вод при климатических вариациях. В условиях глобального потепления основное внимание уделяется развитию методов оценки ресурсов и режима подземных и поверхностных вод при вероятных сценариях изменений климата и антропогенных воздействий. При региональной оценке современных величин подземного стока и возобновляемых (естественных) ресурсов подземных вод особое место занимают исследования изменения величин питания подземных вод при нестационарном климате. В последние годы гидрогеологами ИВП совместно со специалистами кафедры гидрологии МГУ выполнена оценка и проведён анализ изменений характеристик годового, межennaleго и минимального месячного стока рек Европейской части РФ (ЕЧР) за последние 35 лет (до 2012 г.) в сопоставлении с предыдущими периодами наблюдений. Исследованы генезис стока для разных бассейнов рек и выявлены основные причины современных изменений стоковых характеристик. Установлены региональные закономерности гидролого-гидрогеологических процессов и проведено районирование территорий Европейской России по особенностям формирования подземного и поверхностного стока. Проведена переоценка возобновляемых (естественных) ресурсов поверхностных и подземных вод за 1978–2012 гг. с построением соответствующих карт. Выполнен анализ водообеспеченности и нагрузки на водные ресурсы.

Изменения климата уже привели к существенным изменениям водного режима и условий формирования водных ресурсов в ряде крупных регионов. Рост средних годовых и особенно зимних температур воздуха в совокупности с атмосферными осадками оказали значительное влияние на водность рек и режим подземного и поверхностного стока. Пространственно-временные распределения средних годовых, межennaleных и минимальных характеристик стока практически всех речных водосборов ЕЧР использованы как показатели возобновляемых водных ресурсов подземных и поверхностных вод по речным бассейнам и субъектам РФ. Для визуализации и анализа распределения полученных величин водных ресурсов и ряда других параметров построены карты с использованием ГИС-технологий [1; 23].

Изучены современные гидролого-гидрогеологические условия ЕЧР. Для пространственно-временного анализа изменений условий

формирования и динамики водных ресурсов с 1945 по 2012 г. собраны материалы почти по 350 водосборам ЕЧР, выбранным в качестве репрезентативных. Для этих водосборов рассчитаны среднемноголетние значения и коэффициенты вариации годовых и минимальных месячных расходов воды зимней и летней межени, коэффициента естественной зарегулированности стока и проведена проверка статистической однородности рядов.

На основе совместного анализа стоковых характеристик для 60 репрезентативных бассейнов средних рек, сезонных осадков и температуре приземного воздуха для 200 метеостанций в пределах ЕЧР установлено, что 1978–82 гг. характеризуются как пороговые начала изменений формирования стока под влиянием климатических условий. Увеличение числа, продолжительности и «глубины» оттепелей, общее сокращение длительности холодного периода года служат причиной уменьшения глубины промерзания зоны аэрации и соответствующего увеличения инфильтрационного питания подземных вод. Практически для всех водосборов фиксируется сокращение доли стока за половодье и увеличение меженных расходов воды, что меняет форму и общий вид гидрографа стока. В результате сложившейся климатической ситуации создались в целом благоприятные условия для формирования подземного стока и возобновляемых ресурсов.

Показано, что распределение величин ресурсов подземных вод на территории ЕЧР определяются тремя основными природными факторами: климатическими, ландшафтно-орографическими и гидрогеологическими (состав и фильтрационные свойства водовмещающих пород и зоны аэрации, глубина залегания подземных вод, степень дренированности), что наиболее отчётливо проявляется на малых водосборах и неглубоких водоносных горизонтах.

В последние годы происходят радикальные изменения условий формирования речного стока и его режима, сопровождающиеся значительным снижением неравномерности внутригодового распределения, увеличением подземной и частично поверхностной составляющих речного стока. Эти процессы носят региональный характер, что в конечном итоге приводит к значительному увеличению естественной зарегулированности стока.

Изменение величин возобновляемых (естественных) ресурсов подземных вод, которые обычно эквивалентны меженному стоку, отмечается для большинства рек ЕЧР. В начале 21 в. модули меженного (подземного) стока рек и, соответственно, естественные ресурсы подземных вод ЕЧР возросли в среднем на 40–60 % по сравнению с величинами до середины 1970-х гг. Положительные значимые тренды (при уровне 95 %) стока зимней и летне-осенней межени характерны для бассейнов верхней и средней Волги, Оки, большей части бассейна Урала.

Изменения минимального месячного стока и соответствующих ресурсов подземных вод в среднем составляют 1–2 л/(с·км²). Наиболее существенное увеличение минимальных ресурсов (50–70%) происходит в верхнем течении Оки, среднем течении Волги, в бассейне Урала в верхнем течении Дона. К югу от этой полосы (устье и среднее течение Дона, Предкавказье) рост минимального стока менее значителен (до 15%) вплоть до его снижения.

Актуальность выполненных исследований постоянно возрастает в связи с сохраняющейся нестационарностью климатических характеристик. В результате установлено, что наиболее значимые изменения условий формирования водных ресурсов связаны с подземной составляющей речного стока (меженный и минимальный месячный сток), которая служит лимитирующим фактором водообеспечения территорий.

Основные результаты проведенных исследований:

- выявлены вариации годового, меженного и минимального стока рек, которые свидетельствуют о существенных изменениях в многолетних колебаниях водных ресурсов;
- установлено существенное увеличение средних меженных и минимальных месячных расходов воды;
- для большинства рек произошли изменения в генезисе их питания, обусловившие изменение режима половодья, его сроков и максимальных расходов, а также значимое увеличение меженного стока, прежде всего, за счет подземных вод. Это приводит к уменьшению максимальных расходов весеннего половодья, уменьшению доли стока за половодье и увеличению расходов воды за летне-осенний период;

- установлено увеличение естественной зарегулированности стока – важнейшего фактора устойчивого водопользования, его безопасности и надёжности;
- естественные ресурсы подземных вод высокой обеспеченности служат лимитирующим фактором при неограниченном сроке их эксплуатации;
- на территории ЕЧР в первой половине 21 в. следует ожидать увеличения водных ресурсов и уменьшения их внутригодовой неравномерности. Однако для южных регионов РФ сохранится дефицит водных ресурсов.

Показано, что обоснованные региональные оценки могут быть получены при наличии продолжительных гидрологических наблюдений не только путём расчленения наблюденных гидрографов речного стока на генетические составляющие, но и осреднения величин стока за меженные периоды. Выбор периода осреднения меженных расходов для различных регионов проводился на основе генетического расчленения гидрографов рек по методике Куделина и сравнения полученной величины подземной составляющей с различными характеристиками меженного стока. В результате проведенных расчётов для ряда рек РФ выполнена:

- оценка временной изменчивости генетических составляющих стока рек в различных ландшафтно-климатических зонах;
- оценка изменения соотношения источников питания рек в различные фазы гидрологического года;
- оценка связи составляющей стока с климатическими стокообразующими параметрами за различные временные интервалы.

На примере ЕЧР выполнены оценки масштаба и степени современных изменений подземной и поверхностной составляющей речного стока. Выявлены закономерности современного распределения и изменения водных ресурсов для ЕЧР и бассейнов отдельных рек, которые определяют условия водопользования в разных регионах страны.

Таким образом, в последние годы происходят существенные изменения условий формирования многолетнего, годового и сезонного стока и его режима, сопровождающиеся значительным снижением неравномерности внутригодового распределения, увеличением подземной и уменьшением поверхностной составляющих речного стока.

Разработка математических моделей фильтрации грунтовых вод и миграции загрязняющих веществ в насыщенно-ненасыщенной среде (А.Ю. Беляев).

Связующим направлением исследований для рассмотренных выше современных задач в области гидрогеологии служит разработка математических моделей и численное моделирование процессов фильтрации подземных вод и миграции загрязняющих веществ в насыщенно-ненасыщенной зоне. Показано, что гетерогенность и анизотропия фильтрационной среды служат ведущими факторами в процессах движения подземных вод, обтекания препятствий и в конечном итоге времени добегания до расчётного горизонта. При этом разработана, апробирована и доведена до практического применения модель сорбции-десорбции загрязняющих веществ в органогенно-глинистых отложениях. Рассмотренные задачи в такой постановке могут служить основой для разработки аналитических решений и численных моделей оценки защищённости подземных вод в зависимости от концентраций загрязняющих веществ на входе в систему, скорости фильтрации и времени добегания до расчётной точки.

Разработана методика оценки изменений уровня грунтовых вод (УГВ) при отсутствии или недостатке данных, необходимых для непосредственного решения фильтрационных задач. Описан эффект немонотонной зависимости скорости процесса восстановления УГВ от коэффициентов фильтрации грунта, подстилаемого высоко проводящими песчаными породами.

Рассмотрена проблема строгого обоснования оценок и выводов, полученных с помощью упрощённых моделей для решения фильтрационных задач с реальным, но неизвестным распределением параметров. Эта проблема связана со свойством монотонности решений уравнений по параметрам. Монотонность зависимости решений нестационарных фильтрационных задач от распределения коэффициентов фильтрации не является очевидной. Тем не менее, на достаточно больших временах процесса фильтрации монотонность всё-таки имеет место, т.е. чем больше коэффициенты фильтрации, тем быстрее происходят изменения УГВ. В результате обосновано это качественное свойство решений уравнений фильтрации. Выполнена реализация ситуаций, когда для неоднородных

грунтов с меньшей проницаемостью процесс подъёма УГВ может происходить быстрее, чем для более проницаемого грунта. Это решение имеет отношение к процессу обводнения торфяников, у которых подстилающим для торфа слоем служит высокопроницаемый водонасыщенный песчаный грунт.

Описанные теоретические положения применены к гидрогеологическим проблемам, возникающим при обводнении болотных массивов способами, предполагающими возможность активного регулирования УГВ. Разработана методика, позволяющая давать строго обоснованные оценки эффективности такого регулирования при отсутствии или недостатке данных, необходимых для непосредственного решения фильтрационных задач.

Изучение болотных массивов как естественных барьеров при миграции загрязняющих веществ и при интенсивном антропогенном воздействии (пожары и обводнение) (Н. П. Ахметьева)

В связи с охраной подземных вод как компонента окружающей среды, особое внимание уделяется изучению болотных массивов как естественных барьеров на пути миграции загрязняющих веществ и интенсивном антропогенном воздействии. В результате натуральных и лабораторных экспериментов уточнены направленность и масштабы деградации органического вещества и торфов при пожарах на болотах. Показано, что эти процессы сопровождаются изменением не только вещественного состава, но и гидрофизических и экологических свойств болотных отложений. Кроме того, наблюдения на болотных массивах в разной степени подверженных пожарам позволили выделить различные стадии восстановления болотной растительности и регенерации органического вещества и заторфованности отложений. При данных исследованиях рассматривались различные схемы и методы обводнения болотных массивов в качестве профилактического мероприятия от их возгорания. Установлено, что в зависимости от строения самого болотного тела и фильтрационных характеристик подстилающих пород режимы обводнения и методика их осуществления могут быть различны. Полученные результаты апробированы на болотах Рязанской и Тверской областей.

Проведённые исследования показывают, что восстановление химического состава болотных вод происходит достаточно быстро.

Однако, направление, в котором будут происходить дальнейшие изменения территорий выгоревших болот – по пути восстановления торфяного болота или развития нового ландшафта (заболоченного луга или леса) – определить пока невозможно. Ответ на этот вопрос потребует изучения условий обводнения территории (как естественного, так и антропогенного), развития почвенного и растительного покрова, а также характера микробиологических процессов.

Изучение влияния интенсивной эксплуатации подземных вод Московского региона на их гидрогеодинамический и гидрогеохимический режимы (В.Л. Злобина).

Проанализированы многолетние данные пространственно-временных особенностей гидрогеодинамического и гидрогеохимического режима подземных вод Московского региона за 1957–2015 гг. Особое внимание уделялось территориям, характеризующимся стабильными снижениями пьезометрических напоров в эксплуатируемых водоносных горизонтах. Характер амплитуд изменения пьезометрических уровней сопоставлялся с особенностями формирования гидрогеохимических типов подземных вод. Термодинамическим моделированием установлено, что выщелачивание и комплексообразование являются приоритетными в гидрогеохимических процессах в водоносных горизонтах. Для ряда основных химических элементов соединений (Ca^{2+} , Sr^{2+} , Fe , SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^- и др.) установлены взаимосвязи с изменением режима эксплуатации подземных вод в средне- и нижнекаменноугольных водоносных горизонтах. В результате обобщений установлено изменение условий естественной защищённости подземных вод при загрязнении природной среды.

Учитывая дефицит ресурсов подземных вод во многих субъектах центральной части Европейской России, исследованы различные режимы отбора подземных вод, включая оценку воздействия на окружающую среду так называемой переэксплуатации подземных вод на различных месторождениях, в том числе твёрдых полезных ископаемых. В результате постоянного водоотбора многие горизонты подземных вод в пределах Московского региона и сопредельных областей оказались осушены. В связи с этим данные территории продолжают испытывать водный дефицит. Наряду с оценкой воздействия отбора на геологическую среду выполнены расчёты по

ущербу речному стоку и активизации выщелачивания водосодержащих известняков с активизации процессов карстообразования. Показано, что в этом случае ведущим фактором служит недонасыщенность или агрессивность водных масс по отношению к основным водосодержащим минералам (известняк, доломит, гипс и др.). В результате в центральных районах Европейской России практически нет пресных подземных вод, удовлетворяющих стандартам на питьевую воду, за счёт их постоянного загрязнения стабильным стронцием, фтором, литием, а также в верхней части разреза – кадмием и даже мышьяком.

**Оценка перспектив использования ресурсного потенциала
пресных подземных вод с целью повышения
водообеспеченности различных регионов страны.
(Зекцер, А.В. Дзюба).**

Для описания пространственно-временных закономерностей многолетних изменений метеорологических характеристик, определяющих ресурсы подземных вод на территории РФ, использована методика расчёта композиции статистических оценок трендов 1-го и 2-го порядков, основанная на статистических испытаниях.

Рассмотрение влияния лишь отдельных атмосферных переменных на подземные воды предопределяет неучёт синергетического эффекта, формирующегося при воздействии ансамбля климатообразующих факторов. Тем самым снижается уверенность в получаемых результатах. Важнейшие климатоформирующими факторами являются концентрация в воздухе термодинамически активных газов, температура и влагосодержание слоя взаимодействия (приземного слоя воздуха и зоны аэрации). Важнейшее свойство этих характеристик – их континуальность по пространству и времени. В отличие от влагосодержания атмосферы, атмосферные осадки квантованы по пространству и времени и лишь отчасти характеризуют интенсивность и направление влагообмена между атмосферой и зоной аэрации. К тому же статистически и физически значимые неопределённости, возникающие при анализе атмосферных осадков последних десятилетий, осреднённых по регионам РФ, обусловлены неодинаковой репрезентативностью данных наблюдений. Достоверность линейного приближения многолетнего роста содержания CO_2 в тропосфере 99%. Коэффициент линейной аппроксима-

ции увеличения концентрации метана в тропосфере в течение последних десятилетий также близок к 0,99. Рост температуры приземного воздуха в интервале 1936–2014 гг. в большинстве регионов РФ (кроме южных районов) характеризуется статистически значимым положительным линейным трендом на 0,05 уровне. Однако авторы полагают, что для описания многолетних регионально осреднённых атмосферных осадков в интервале 1936–2011 гг. предпочтительна модель стационарного ряда с присущей ему естественной изменчивостью. Накопленный эмпирический материал о многолетних изменениях климатических переменных не позволяет надёжно оценить величину изменения ресурсов подземных вод в результате именно климатических девиаций. В настоящее время невозможно сформулировать обоснованное суждение о климатической чувствительности и уязвимости ресурсов подземных вод в масштабе времени порядка нескольких десятилетий.

Исследование трансформации качества подземных вод под влиянием природных и антропогенных факторов (А.П. Белоусова).

Развиты научные основы концепции экологического мониторинга подземных вод при диффузном и точечном загрязнении окружающей среды для объектов нефтегазовой промышленности и атомных станций. Предложенная структура мониторинга может быть общей для всех точечных и диффузных источников загрязнения. В связи с влиянием таких объектов как источников загрязнения на окружающую среду мониторинг должен быть комплексным, включающим наблюдения за всеми компонентами окружающей среды (атмосфера, литосфера, гидросфера, биосфера, техносфера). При этом предложенная система мониторинга исходит из того, что АЭС приводят к нарушению геологических, геохимических и экологических условий на прилегающих к АЭС территориях, а при авариях на АЭС – к загрязнению огромных территорий (Чернобыльская АЭС – ЧАЭС). Важным аспектом таких наблюдений и исследований служит оценка степени защищённости и уязвимости подземных вод и особенно грунтовых вод к загрязнению чернобыльскими радионуклидами. Методика среднемасштабной оценки защищённости и уязвимости подземных вод к загрязнению разработана и апробирована на нескольких регионах страны. Эта оценка позволит

корректировать размещение наблюдательной сети (связь с подсистемой наблюдений) на изучаемом объекте. [4]

Оценка целесообразности применения искусственного восполнения для удовлетворения перспективной потребности в воде. Показано, что при искусственном восполнении пресных подземных вод в Краснодарском крае целесообразно использовать соотношение 45% поверхностных вод р. Кубань и 55% подземных вод краснодарского водоносного горизонта. С другой стороны, наиболее целесообразными соотношениями при смешивании поверхностных и подземных вод в Республике Калмыкия будут 69% поверхностных вод р. Яшкуль и 31% подземных вод ергенинского водоносного горизонта. Аналогичные соотношения обоснованы для других месторождений подземных вод.

Среди основных задач дальнейших исследований в области гидрогеологии в ИВП следует выделить: развитие научно-методических основ оценки современного состояния и прогноза подземного стока и возобновляемых ресурсов подземных вод в изменяющихся естественных и антропогенных условиях; разработка и совершенствование математических моделей для численных экспериментов фильтрации подземных вод и миграции различных загрязняющих веществ; оценки взаимодействия подземных и поверхностных вод для уточнения вклада различных генетических составляющих речного стока; оценка изменений качества подземных вод и их загрязнений с учётом климатических вариаций и антропогенных воздействий; изменений ресурсов подземных и поверхностных вод отдельных регионов и водосборов РФ для разработки оптимального режима возможного использования водных ресурсов при различной нагрузке; исследование условий использования ресурсов подземных вод и оценка их защищённости в регионах РФ с интенсивной хозяйственной деятельностью.

Сотрудники лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды занимаются педагогической деятельностью, в течение многих лет преподают в различных университетах курсы «Гидрогеологии», «Геоэкологии» и «Охраны окружающей среды». Ими подготовлены и изданы учебники по этим дисциплинам. В частности, Белоусова является соавтором известного учебника «Экологическая гидрогеология: Учебник для вузов. – М.: ИКЦ «Ака-

демкнига», 2006. 397 с., Джамалов – автор учебника по «Инженерной геоэкологии. Основы гидрогеологии, инженерной геологии, геокриологии», Дубна, 2016. 505 с.

Результаты научных исследований опубликованы в многочисленных монографиях, сборниках трудов, отдельных статьях. Краткий список основных публикаций приведен ниже.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России // Под ред. Р.Г. Джамалов, Н.Л. Фролова. М.:ИВП РАН, 2015, 96 с.;

2. Ахметьева И.П., Лола М.В., Горецкая А.Г. Загрязнение грунтовых вод удобрениями. М.: Недра, 1991. 99 с.;

3. Белоусова А.П. К методике оценки естественной защищенности подземных вод от радиоактивного загрязнения // Водные ресурсы. 1993;

4. Белоусова А.П. Мониторинг подземных вод в районах расположения АЭС. Разведка и охрана недр. №4, 2015. С. 65–71.

5. Белоусова А.П. Оценка защищенности подземных вод от загрязнения радионуклидами // Вода: химия, экология. №5, 2012. С. 11–17.

6. Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В. Экологическая гидрогеология: Учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 397 с.

7. Джамалов Р.Г., Месхетели Л.В., Подземный водообмен суши и моря. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 207 с.;

8. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Месхетели А.В. Подземный сток в моря и Мировой океан. М.: Наука, 1977. 94 с.;

9. Джамалов Р.Г., Обьедков К.Л. Гидрогеологическое районирование при прогнозной оценке ресурсов подземных вод по космоснимкам // Оценка и рациональное использование ресурсов подземных вод. М.: Наука, 1980. С. 129–139;

10. Зекцер И.С. Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения. М.: Паука, 1977. 173 с.;

11. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г., Месхетели Л.В. Подземный водообмен суши и моря. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 207 с.;

12. Злобина В.Л. Влияние эксплуатации подземных вод на развитие карстово-суффозионных процессов. М.: Наука, 1986. 133 с.;

13. Ковалевский В.С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией. М.: Недра. 1986. 200 с.;

14. Ковалевский В.С. Многолетние колебания уровней подземных вод и подземного стока. М.: Наука, 1976. 200 с.;

15. Ковалевский В.С. Многолетняя изменчивость ресурсов подземных вод. М.: Наука. 1983. 205 с.;

16. Ковалевский В.С. Основы прогнозов естественного режима подземных вод. М.: Стройиздат, 1974. 204 с.;

17. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 153 с.;

18. Ковалевский В.С., Гынкова Л.М. Прогнозная оценка вероятной изменчивости питания подземных вод в будущем при решении задач водоснабжения // Водные ресурсы. №3, 1993.

19. Ковалевский В.С., Максимова Н.Г. Прогнозная оценка естественных ресурсов подземных вод в ближайшем будущем // Водные ресурсы. №2, 1938. С. 41–49;

20. Ковалевский В.С., Медовар Ю.А. К методике учета гидрогеологических показателей при обосновании оптимальной отметки НПУ водохранилища // Водные ресурсы. №1, 1989. С. 162–165;

21. Подземные воды Мира: ресурсы, использование, прогнозы. Изд-во «Наука», 2007. 36 п.л.;

22. Подземный сток Центральной и Восточной Европы. М.: ВСЕГИНГЕО, 1982. 288 с.;

23. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России // Под ред. Р.Г. Джамалов, Н.Л. Фролова. М.: ГЕОС, 2015. 320 с.

24. Groundwater Resources of the World and Their Use (International Mono-graph), UNESCO, Paris, 2004, 36 п.л.;

25. Role of Ground Water in the Hydrological Cycle and in Continental Water Balance / VPrepared by I.S. Zektser and R.G. Dzhamalov. UNESCO International Hydrological Programme IHP-1II Project 2.3. Unesco Paris: 1988. 138 p.;

26. World Map of Hydrogeological Conditions and Groundwater Flow, scale 1:10 000 000, Hydrosience Press, USA, 1999;

27. Zektser I., Dzhamalov R. Submarine Groundwater, CRC Press, USA, 2007. 466 p.

Оценка современного состояния водообеспеченности района западных подстепных ильменей

П.И. Бухарицин

Введение

Одной из стратегических целей водного законодательства Российской Федерации является гарантированное обеспечение водными ресурсами устойчивого социально-экономического развития регионов. Достижение этой цели в различных отраслях экономики тесно связано с развитием водохозяйственной системы речного бассейна. Это возможно лишь при совершенствовании системы управления. При этом необходимо учитывать особенности формирования водных ресурсов конкретной территории.

Развитие и функционирование водного хозяйства в настоящее время происходит не в стационарной природной среде. Непосредственное воздействие хозяйственной деятельности на водные объекты достигло таких масштабов, что эти объекты изменяются под влиянием антропогенных причин быстрее, чем удаётся изучить эти изменения и принимать соответствующие водоохранные меры.

После создания каскада водохранилищ на Волге наиболее трудно разрешимой проблемой стало регулирования стока воды в её нижнем течении. В современных условиях требования различных водопользователей этого региона существенно отличаются, порой противоречивы.

Астраханская область имеет свои особенности формирования водных ресурсов. При практически полном отсутствии запасов подземных вод, в условиях аридного климата, река Волга, её рукава и протоки являются единственным источником водоснабжения на бытовые и хозяйственные нужды для 1 млн населения области.

Сложностью управления водохозяйственной системой Нижней Волги является её многофункциональность. Современные рыночные отношения формируют экономику региона, но каждая отрасль народного хозяйства добивается приоритета, преследуя свои собственные цели и выбирает методы и способы приемлемые и более выгодные для неё. При этом забывая, что Волга и дельта – это единый живой организм, единый природный комплекс.

Объект исследований, его положение, границы, значение

Значимость отдельных природных комплексов в устьевой области Волги в социально-экономическом развитии региона неоднозначна. В потребностях водных ресурсов каждый из них имеет свои особенности.

Одним из крупнейших и значимых экономических районов являются Западно-подстепные ильмени (ЗПИ), расположенные на юго-востоке дельты Волги, они занимают площадь в 4300 тыс. км² с населением более 100 тыс. человек. Основные поселения расположены вдоль ильменей, которые с древних времён были объектом ловли рыбы, ведения сельского хозяйства, получения соли. Главным системообразующим фактором всей территории ЗПИ является водный сток реки Волги.

Средняя многолетняя приточность воды в ЗПИ составляла 4,4 км³, а оттока 2,2 км³ (1940–55 гг.). В последние годы приточность снизилась до 2,6 км³, а в 1996г. – всего 0,76 км³, отток – 1,5 км³. Средние глубины уменьшились до 1,0–0,5 м, увеличилась площадь зарастания, ухудшилось качество воды, что стало первостепенной проблемой для почти 100-тысячного населения этого района, других источников пресной воды район ЗПИ не имеет. В большую часть ильменей вода поступает в половодье из основных водотоков дельты: с основного русла Волги, рук. Бахтемир, крупного протока Хурдун и 20 более мелких протоков, а также по семи государственным системам – Бежкульскую, Дарминскую, Прикаспийскую оросительные системы, Восточенскую, Камышескую, Зареченскую, Лиманскую водные системы, которые обеспечивают подпитку водой ильмени для орошения сельскохозяйственных угодий и обводнения населённых пунктов. В другие ильмени вода подкачивается насосными станциями. Для предотвращения обратного стока воды в межень часть ильменей перекрывают земляными дамбами.

Поданным космосъёмки в многоводном 1991 г. (159,4 км³ за IV–VI), на пике половодья при расходе воды 30000 м³/сек площадь затопления ЗПИ составляла около 50%. В маловодные (в 2006 г. – 99,3 км³) и средневодные годы (2004 г. – 105,9 км³) заливаемость снижалась до 35–40% и многие ильмени пересохла. Сложная ситуация сложилась в половодье 2011 г., которое оказалось крайне маловодным – около 77 км³ (апрель–июнь). Водообеспеченность резко снизилась, до большей

Уловы рыб по годам в ЗПИ

Виды рыб	Уловы по годам, в тоннах					
	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Сазан	0,3	2,7	0,171	0,131	0,113	–
Судак	0,513	0,3	–	–	–	–
Сом	1,401	1,0	–	–	–	–
Лещ	5,246	4,26	1,624	1,038	5,374	–
Щука	0,425	1,13	0,03	0,122	4,088	–
Жерех	–	0,1	–	–	–	0,729
Толстолобик	0,109	0,5	–	2,685	–	0,483
Белый амур	0,1	–	–	–	–	–
Линь	0,254	0,517	–	0,053	0,765	7,203
красноперка	3,41	5,029	0,342	8,292	1,846	16,4
Карась	35,366	47,39	3,541	2,483	1,618	16,309
Окунь	0,446	1,027	0,147	0,689	1,088	2,618
Густера	1,405	9,603	0,136	1,263	–	2,292
Синец	–	–	0,01	0,379	–	–
Вобла	0,012	0,5	1,164	–	–	–
ВСЕГО	48,987	74,05	7,165	17,13	16,75	46,034

части ильменей вода просто не дошла, а остальные были залиты на 30–35%.

На основе анализа космических снимков установлено, что на пике и начале спада средних и высоких половодий площадь водной поверхности составляет соответственно 25% и 35% от общей площади ильменей, а в летнюю-осеннюю уменьшается до 11%.

Рыбохозяйственный фонд ЗПИ включает 278 ильменей площадью более 80 тыс. га, из них около 20 тыс. га непосредственно прилегают к Волге и рук. Бахтемир и являются ценными нерестилищами полупроходных рыб. Ихтиофауна ЗПИ представлена почти всеми видами рыб Волго-Каспийского бассейна. Распространение рыб по ильменям обуславливается особенностями водоёмов и уровнем приспособленности рыб к условиям обитания (гидрологическим, гидрохимическим факторам, условиям питания).

В ильменях в 2010 г. было выловлено 46 т. рыб (табл. 1).

Снижение объёмов воды, ухудшение её циркуляции, зарастание ильменей привело не только к снижению рыбопродуктивности, но и к потере нерестилищ, их обсыханию. В результате изменился

видовый состав рыб, исчезают ценные виды – судак, жерех, сазан, а их нишу занимают краснопёрка, карась, линь (табл. 1). Гидрологическая обстановка в ЗПИ ухудшается не только в результате снижения естественного водного стока. Немаловажной причиной является антропогенная деятельность. Данный регион играет немаловажную роль в социально-экономическом развитии Астраханской области. Но несовпадающие интересы частных арендаторов, использующих земли, кто в целях рыбоводства, кто для сельского хозяйства, а коммунальных служб для водообеспечения населения приводят к тому, что наблюдается стихийное, самостоятельное регулирование стока воды, а в некоторых случаях даже перекрывается подача воды в соседние ильмени.

Оросительные системы построены в советское время, их техническое состояние крайне неудовлетворительно. Многие современные небольшие дамбы возведены незаконно. По данным «Службы природопользования и охраны окружающей среды Астраханской области», насчитывается более 200 гидротехнических сооружений, собственники которых не установлены.

Пропускная способность водогонных каналов зависит от их ширины и глубины, однако в настоящее время суммарное поперечное сечение сильно уменьшилось в результате хозяйственной деятельности (прокладка транспортных магистралей, дамб) и природных факторов (заиление, зарастание растительностью, малые глубины).

В конечном итоге ильмени засоляются и в результате даже прилегающие к водному тракту земли постепенно осолоняются, увеличивая площади солончаков. Самая южная и многочисленная группа ильменей снабжается водой по Прикаспийскому водному тракту самотёком в период половодья. Но антропогенная деятельность в сумме с природными процессами нарушила пропускную способность воды по каналам. В результате ряд ильменей прекратил своё существование, а остальные испытывают дефицит воды. Вода в ильменах не пригодна к использованию, т.к. её минерализация составляет от 5–10 г/л в слабопроточных до 55 г/л в непроточных ильменах.

В результате, массовое и бесконтрольное строительство и эксплуатация малых гидротехнических сооружений на ильменах усугубляет ситуацию.

губляет негативные последствия зарегулирования стока Волги и сдерживает поступление воды в зону ЗПИ. Ослабление или полное отсутствие контроля за сооружениями и их эксплуатацией, самовольная ликвидация приводят к ухудшению положения не только в местах их нахождения, но и на соседних водоёмах.

Следовательно, на общую гидрологическую ситуацию в районе ЗПИ влияет комплекс факторов – природных (водный сток, климат и гидролого-морфометрические особенности территории) и антропогенные (управление, хозяйственное назначение, технологии и прочие), как отмечает В.Г. Пряжинская «важнейшим элементом устойчивого управления водных ресурсов является интеграция различных точек зрения и интересов. Нужны согласованные действия управления водными, земельными ресурсами, поверхностными и подземными водами...», только комплексный подход позволит решить проблему водообеспеченности ЗПИ.

Изучение гидрологического режима ЗПИ идёт разрозненно разными ведомствами с разными целями и задачами. В результате, в настоящее время мы имеем разрозненную информацию. В этих исследованиях район ильменей не представлен как единый гидрографический комплекс. Поэтому необходимо создать стандартную и оптимальную форму их проведения. Не менее важны единые способы и формы обработки данных.

Традиционные методы мониторинга водных объектов на Нижней Волге базируются на точечных наземных сетевых измерениях глубины и объёмов водных потоков, которые затем интерполируются при переходе к пространственной модели. Из-за разрушения единой наблюдательной гидрометеорологической сети стало практически невозможно дать объективную оценку гидрологического режима различных участков Нижней Волги.

Для обследования больших территорий возможно использование аэровизуальное наблюдения или аэрофотосъёмки. Но при выполнении аэровизуальных обследований необходимо наличие большого количества наземных ориентиров и хорошие топографические карты.

Аэрофотосъёмка более информативна при наличии нескольких последовательных фотосъёмок. Но хорошие снимки получаются в случае, если разлив воды представлен ровной водной поверхностью.

Заросшие водоёмы затрудняют, ограничивают применение аэрофотосъёмки на большом протяжении ильменей.

На современную высоту уровня воды в Волге и заливаемости ВАП, нерестилища и ЗПИ влияет интенсивный размыв русла в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС. В своей работе Г.А. Мажбиц и Е.П. Буланова отмечают что, понижение базиса эрозии русла реки от нижнего бьефа Волгоградской ГЭС до Енотаевки, связанное с общим размывом русла превысило проектные отметки и составляет 1,5–1,7 м при меженных расходах и 0,5–0,6 в половодье. В результате для поддержания гарантированных глубин и водообеспечения ВАП нужны повышенные расходы воды с ГЭС до 6 тыс. м³/с. против 4 тыс. м³/с. Суточные и недельные перепады воды в нижнем бьефе (особенно в воскресные дни) дестабилизируют водный режим (Мажбиц).

Такую же закономерность отмечают И.В. Землянов и О.В. Горелиц (ГОИН) «в зоне ЗПИ и ВАП наблюдается тенденция постепенного врезания (понижение абсолютных отметок дна) русла магистрального рук. Бахтемир и Волги. Одновременно с врезанием русла магистрального водотока происходит заиление и отшнуровывание истоков водотоков, обеспечивающих поступление воды в водоёмы».

Снижение абсолютных отметок дна русла магистрального водотока и фактическое повышение отметок дна истоков, питающих ильмени, приводит к тому, что с каждым годом при половодье одного и того же объёма воды абсолютные отметки уровни воды в магистральном водотоке снижаются. С течением времени для поступления равных объёмов воды на ЗПИ необходимо обеспечить более высокие уровни воды в нижнем бьефе, а это потребует увеличения максимальных сбросов воды в нижний бьеф с Волгоградского водохранилища.

Зафиксировать и оценить эти процессы на различных стадиях полевыми исследованиями возможно только при комплексном постоянном мониторинге. Это практически невозможно, учитывая размеры площадей ЗПИ. Поэтому в наши дни на первое место выходит использование космических снимков – дистанционное зондирование земли (ДЗЗ). Научная и методическая результативность использования материалов ДЗЗ с наземными наблюдениями не вызывает сомнений.

Кроме того, космические снимки можно и нужно использовать комплексно, корпоративно разными ведомствами. В результате это будет выгодно для многих субъектов и органов государственного управления, которые будут иметь комплексную картину происходящих природных процессов и смогут оперативно принимать нужные решения. Поэтому своевременная доставка нужной информации представляет большой экономический эффект как прямой, так и косвенный.

В последнее время для разработки технологий управления водными ресурсами стали использоваться водно-балансовые модели, что позволяет более эффективно использовать ограниченные водные ресурсы.

Анализ гидрографов весеннего попуска объёмов воды, уровней и особенностей распределения стока по основным водотокам показал, что в настоящее время в силу различных причин график «оптимального» сброса достаточного объёма воды в ильмени может корректироваться в ограниченных пределах, что затрудняет своевременное принятие решений о параметрах распределения воды по системам ЗПИ. Сотрудниками ГОИНа, ИВП АН РАН, Астраханского ЦГМС была разработана новая водно-балансовая модель района ЗПИ, позволяющая рассчитывать с суточной дискретностью приток, изменения объёма воды, видимое испарение и отток в каждом из выделенных районов дельты с учётом водообмена между ними. Результаты расчёта составляющих водного баланса различных районов дельты при различных сценариях гидрологического режима, водохозяйственных и гидротехнических мероприятий могут лечь в основу выработки научных рекомендаций по оптимизации экологического состояния, хозяйственного использования и управления водными ресурсами устьевой области Волги.

Таким образом, для изучения взаимодействия общества и среды обитания необходимо проводить комплексный космовизуальный мониторинг территории как единственно возможный в реальном времени, достоверный метод комплексного и точного анализа состояния окружающей среды, т.е. формирования геоинформационного поля Астраханской области и прилегающей территории, а для принятия решения по управлению водными ресурсами использовать водно-балансовые модели.

ЗПИ – зона хронического экологического бедствия астраханской области

Историческая справка. Первые гидрологические, а точнее гидрографические, исследования западных водоёмов носили описательный характер. Одним из первых исследования водоёмов выполнил академик С.Г. Гмелин в конце 1770-х начале 1780-х гг. Результатами исследований явились сведения о величине ильменей и озёр; освещены вопросы происхождения соленых озёр; составлены две карты озёр, а также дана классификация озёр по степени солёности. В последующие периоды структура исследований особых изменений не претерпела. Из дореволюционных исследований наибольший интерес представляют исследования В.И. Мейснера, который, помимо составления карты дельты Волги (в том числе и западных водоёмов), привёл описание многих ильменей и озёр и предложил принцип классификации ильменей по их генетическим признакам. Наиболее важным гидрологическим фактором, оказывающим решающее воздействие на гидрологический режим западных водоёмов, является сток воды. Первые измерения расходов воды на водотоках (питающих западные водоёмы) были произведены в период исследования Бахтемира и Волго-Каспийского канала с целью улучшения судоходных условий. В 1923–25 гг. были разбиты гидрометрические створы на водотоках Дарма, Ножевский, Бертюль, Алгаза, Хурдун, проток в ильм. Верхний, Бушма, в горле ильм. Бесчастный, Подстепок (в истоке и устье) и измерено по 2–4 расхода воды. Полученные данные наблюдений, несмотря на их приближенность, позволили впервые рассчитать водный баланс западных водоемов. Для обоснования рыбохозяйственных мероприятий в 1937–40 гг. Волго-Каспийской рыбохозяйственной станцией и Гидрорыбпроектом были измерены расходы воды на водотоках, отделяющихся от Волги и Бахтемира, а также на ряде водотоков, протекающих на территории западных ильменей и соединяющих ильменные котловины. Данные об измеренных расходах воды приведены в научной и справочной литературе.

В 1950–52 гг. Астраханский филиал Гипроводхоза измерил расходы протока Хурдун и ряда других протоков в районе западных ильменей. К сожалению, данные этих измерений не обнаружены.

В 1953–54 гг. Волжской устьевой станцией проведены рекогносцировочные обследования западных ильменей и питающих их водотоков. Результаты исследований опубликованы. В 1954 г. эта организация приступила к работам по изучению распределения стока воды в дельте Волги. На отходящих от Бахтемира водотоках было разбито 13 гидрометрических створов, на которых измерялись расходы воды; при этом впервые были измерены расходы воды на мелких водотоках, действующих только в период половодья.

В 1961 г. большие работы по определению приточности воды в западные ильмени провел Волгоградский филиал института «Гидропроект». Исследования проводились на 8 водотоках, причём были измерены расходы воды на водотоках, отходящих от русла Волги. На каждом гидрометрическом створе измерено от 5 до 14 расходов воды. В этом же году измерялись расходы воды на пр. Таранхол. В 1962 г. силами Астраханской ГМО были измерены расходы воды на пр. Подстепок.

В 1976 г. «Каспморниипроект» исследовал сток воды протока Подстепок. По разности расходов воды в истоке и устье стало возможным определить величину отточного стока из западных ильменей; в 1991 г. аналогичные работы выполнил Астраханский ЦГМС.

В 1980–91 гг. Астраханский ЦГМС продолжил исследования распределения стока воды в системе рукава Бахтемир. На семи водотоках, отходящих от Бахтемира в западные ильмени, было измерено 53 расхода воды.

В 1983 г. Астраханское отделение «Гидрорыбпроекта» исследовало сток воды протоков Хурдун и Алгаза в среднем их течении. На трёх гидростворах было измерено 15 расходов воды.

В 1990–92 гг. Астраханский трест инженерно-технических изысканий открыл гидрометрические створы на водотоках Чилимная, Ножевский, Бертюль, Прямой Бертюль, Кривой Бертюль, Алгаза, Хурдун, Икрянка, Верхний, Бирючий, Бушма, Данилин, Копьев, Таранхол, Гаванный, Три ерика, Арбузный. На каждом гидростворе было измерено от 3 до 6 расходов воды. Всего измерено 69 расходов воды.

В течение многих лет исследования стока воды водных трактов проводило управление «Астраханмелиоводхоз». Однако в последние годы учёт стока воды в оросительных системах инструменталь-

ным способом не ведётся, а осуществляется по энергозатратам и производительности насосных станций. В вопросе деформации русел водотоков, питающих западные ильмени, а также заносимости ильменных котловин важное значение имеют сведения о стоке взвешенных наносов. Анализ научной литературы и справочных пособий показал, что данному вопросу должного внимания не уделялось. Расходы взвешенных наносов измерялись в 1954 г. на пр. Хурдуну с. Икряное (12 расходов) и в 1989 г. на семи водотоках, отходящих от рук. Бахтемир (по 3–4 расхода), что крайне мало для оценки стока взвешенных наносов, поступающих в ЗПИ.

Таким образом, работы по определению стока воды, поступающего в ильмени и вытекающего из них, начались достаточно давно; до 2003 г. измерено около 1400 расходов воды, из них 75% приходится на долю гидрометслужбы. Однако их использование затруднительно по причине разновременности наблюдений, различного качества и недостаточного количества измеренных расходов воды на фазах подъёма и спада половодья. Вместе с тем, полученные данные наблюдений позволяют проследить в многолетнем разрезе тенденцию изменчивости стока воды отдельных водотоков. Сведения об измеренных расходах воды и взвешенных наносов в 1937–80 гг. опубликованы в научной и справочной литературе. В связи с прекращением после 1980 г. ежегодных измерений расходов воды в истоке рукава Бахтемир, являющегося главным источником питания западных ильменей, дальнейшие исследования стока воды производились периодически. В отдельные годы выполнялись работы по измерению расходов воды на других водотоках, питающих западные ильмени [1].

Современные исследования ЗПИ. 29 февраля 2000 г. глава Администрации Астраханской области издаёт постановление «О комплексной программе повышения водообеспеченности зоны западных подступных ильменей на 2000–2010 годы». В целях выполнения этого постановления Астраханский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета выполнил значительный объём работ по определению величины приточно-отточного стока воды и взвешенных наносов в западных подступных ильменах. На водотоках, служащих в качестве водоподводящих и водоотводящих объектов, были открыты гидрометрические створы, на которых

измерены расходы воды и взвешенных наносов с учётом полного размаха колебаний уровня воды, как на подъёме половодья, так и на спаде. Кроме того, дополнительно были измерены расходы воды на других протоках [2].

Сведения о гидрометрических створах и количестве измеренных расходов воды и взвешенных наносов приведены в табл. 2.

Полученные результаты исследований стока воды и взвешенных наносов дали возможность определить схему поступления и отточности воды и наносов в исследуемом районе, рассчитать водный баланс и баланс стока наносов, их пространственное распределение, а также показать тенденцию изменчивости стока воды и наносов под воздействием различных факторов как отдельных водотоков, так и общей величины стока воды, поступающего в ильмени и вытекающего из них. Следует указать, что проведённые исследования стока воды и взвешенных наносов в 2003–07 гг. как по объёму, так и по масштабу охваченной наблюдениями территории западных ильменей, заметно выделяются на фоне исследований, выполненных в прежние годы силами различных организаций. В 2008 г. Астраханский ЦГМС выполнил работы по изучению отдельных элементов ледового режима ильменей и озёр экспедиционным путём. Так, 27 января 2008 г. проведены визуальные наблюдения за замерзаемостью солёных озёр, расположенных вдоль автодороги Линейное-Хулхута. Несмотря на достаточную сумму градусо-морозов (-362°C по данным МС Астрахань), большинство солёных озёр (Солёное у с. Линейное, Мусалин-Хак, Мазна-Хак и др.) не имело ледяного покрова. 14 февраля 2008 г. были выполнены визуальные наблюдения над условиями замерзания солёных озёр вдоль автодороги Буруны-Михайловка и инструментальные измерения толщины льда на протоках Дарма, Садовка, Три ерика, Верхний, Хурдун, Бертюль и ильменях Горчишный, Шушай, Япрак, Чичин, Малиновский, Фарпус, Раздолье, Передний Хатын, Газын, Чанта, а также на Лиманском канале. В период измерения толщины льда на шести водных объектах произведён отбор проб воды с целью определения солевого состава воды и его воздействия на условия замерзания ильменей и озёр. Параллельно с наблюдениями на стационарных временных гидрологических постах Астраханского ЦГМС выполнил в 2005–07 гг. экспедиционные наблюдения над уровнем воды путём нивелирования горизонтов

Таблица 2

Гидрометрические створы Астраханского ЦГМС

№ п/п	Водоток	Географические координаты		Количество измеренных расходов									
				2003 г.		2004 г.		2005 г.		2006 г.		2007 г.	
		с.ш.	в.д.	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
1	Бахтемир	46°13'	47°54'	6	6	—	—	—	—	—	—	—	—
2	Каньга	46°18'	47°59'	—	—	8	6	1	—	5	1	7	5
3	Малая Дарма	46°18'	47°57'	7	5	8	6	—	—	—	—	—	—
4	Дарма	46°17'	47°55'	10	8	8	7	12	10	5	2	6	5
5	Ножевский	46°14'	47°54'	11	9	12	10	15	11	9	7	10	8
6	Без названия у с. Кр. Баррикады	46°13'	47°52'	8	6	9	7	8	4	2	—	8	5
7	Бертюль	46°12'	47°52'	12	10	13	9	15	11	8	7	10	8
8	Алгаза	46°11'	47°50'	9	7	8	5	11	10	6	2	7	5
9	Без названия у с. Бахтемир	46°10'	47°49'	9	7	9	8	8	6	6	4	8	7
10	Порещин	46°08'	47°47'	3	2	7	5	4	2	—	—	6	4
11	Хурдун	46°06'	47°44'	8	7	11	10	13	10	8	7	8	8
12	Икрянка	46°06'	47°44'	8	6	9	8	11	9	8	4	8	7
13	Верхний	45°58'	47°38'	11	10	11	10	14	11	7	6	10	8
14	Бирючий	45°57'	47°38'	11	10	11	10	16	10	8	7	10	8
15	Бушма	45°57'	47°37'	11	10	11	10	15	11	8	6	10	8
16	Данилин	45°56'	47°37'	11	10	11	10	16	9	8	6	10	8
17	Копьев	45°56'	47°37'	11	9	10	9	16	8	8	6	10	8
18	Без названия	45°55'	47°37'	9	6	9	8	11	9	6	5	10	8
19	Таранхол	45°55'	47°37'	11	10	12	10	18	11	8	7	10	8
20	Три ерика	45°52'	47°36'	8	7	10	10	13	11	5	5	8	8
21	Арбузный	45°52'	47°35'	—	—	6	—	13	10	7	4	9	8
22	Хурдун	46°05'	47°39'	7	7	10	10	—	—	—	—	—	—
23	Без названия	46°05'	47°39'	4	—	2	—	—	—	—	—	—	—
24	Соленая дорога	46°06'	47°39'	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—
25	Киссин	46°03'	47°39'	—	—	6	—	—	—	—	—	—	—
26	Хаптха	46°13'	47°15'	—	—	—	—	—	—	4	—	3	—
27	Бува	46°15'	47°39'	—	—	—	—	5	—	—	—	1	—
28	Форпус	46°07'	47°08'	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—
Всего:				185	152	216	168	235	163	126	86	171	134

Примечание: а – количество измеренных расходов воды; б – количество измеренных расходов взвешенных наносов

воды протоков, ильменей и озёр. В каждом пункте выполнено по 3–26 нивелировок горизонтов воды; на большинстве пунктов измерения проведены на фазе подъёма, пика и спада половодья. В пунктах №№1–6, 8–11, 13–25, 28, 30, 35, 41, 44, 45, 47, 48 измерения выполнены в Балтийской системе высот. Следует указать, что в пунктах №№25–37 нивелирование горизонтов воды выполнялись в 2003–2007 гг. при производстве измерений расходов воды (по 20–26 измерений). На каждом водном объекте в течение апреля–июля было произведено по 4–14 измерений температуры воды. Учитывая, что наблюдения над температурой воды в период экспедиций производились в различное время суток, для получения надёжных зависимостей между температурой воды опорного пункта и временными пунктами были организованы 8 срочные наблюдения над температурой воды (при помощи автоматического гидрологического комплекса ГМУ-2) на опорном пункте наблюдений в г. Астрахани на Золотом Затоне. Полученные результаты экспедиционных наблюдений существенно дополнили массивы данных наблюдений над температурой воды на стационарных пунктах, что позволило более детально осветить пространственное распределение температуры воды по территории западных ильменей.

Следует обратить внимание на равномерность расположения пунктов наблюдений по территории западных ильменей (табл. 3).

Разработка модели водообмена. В 2008 г. по заданию Администрации Астраханской области была выполнена научно-исследовательская работа по теме «Создание модели устойчивого водообеспечения зоны Западных подстепных ильменей Астраханской области». Цель работы – исследовать современное состояние зоны ЗПИ и разработать модель водообмена главного магистрального водотока дельты Волги с ЗПИ, позволяющую выполнять его ежедневный и по фазам половодья расчёт как в ходе половодья, так и с некоторой заблаговременностью при наличии прогноза хода уровня воды на посту Астрахань. Такие расчёты должны лечь в основу выработки решений по принятию мер, способствующих устойчивому водообеспечению зоны ЗПИ Астраханской области. Характеристика современного состояния зоны ЗПИ выполнена путём определения её общей площади, площади водных объектов в межень и на пике половодья, площадей сельскохозяйственных угодий с привязкой к

водным объектам, учёта водных объектов, эксплуатируемых под рыборазведение, выявления и картирования искусственных сооружений, регулирующих подачу воды в ЗПИ, с оценкой их влияния на проточность ЗПИ в период половодья. Закономерности процессов заполнения в половодье и последующей сработки ЗПИ до последнего времени не изучались.

Оценка изменений уровня воды ЗПИ и водообмена главного магистрального рукава дельты Волги с ЗПИ при половодьях различного типа выполнена по данным уникальных наблюдений за уровнями воды в 13 пунктах ЗПИ (2004–08 гг.) и измерений расходов воды в 20 водотоках, связывающих ильмени с главным дельтовым рукавом. Эти работы выполнялись совместно сотрудниками ГОИН и Астраханским центром гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды в рамках экспедиционных грантов РФФИ. Используются также результаты НИОКР Росгидромета и других проектов. На этих данных была обоснована и разработана модель водообмена главного магистрального водотока дельты Волги–Бахтемира с ЗПИ для создания гидрологических основ водообеспечения западных подstepных ильменей в дельте Волги при различных гидрографах половодья [2].

Для параметризации и калибровки модели водообмена главного магистрального водотока дельты Волги с ЗПИ использованы данные измерений расходов воды за 2003–08 гг. в водотоках, связывающих ильмени с главным дельтовым рукавом. В матрице модели использованы впервые построенные и аппроксимированные аналитическими функциями неоднозначные для разных фаз половодья зависимости этих расходов от уровней воды по посту Астрахань. По ним рассчитаны гидрографы расходов воды для паводков разных типов. Водообмен с ЗПИ как за каждый день, так и интегрированный для разных фаз половодья на разных участках по длине главного дельтового водотока, оценён по этим гидрографам алгебраическим суммированием притоков к ильменям и оттоков из них.

В рамках выполненной темы впервые разработана концепция модели устойчивого водообеспечения зоны ЗПИ. Сделан вывод о том, что ее основу должна составлять водно-балансовая модель ЗПИ, учитывающая водообмен главного магистрального рукава дельты Волги с ЗПИ, изменения площади водного зеркала и объём

Таблица 3

**Пункты экспедиционных наблюдений над уровнем воды
в западных ильменях в 2005–07 гг.**

№ п/п	Водный объект	Наименование объекта	Координаты пункта		Количество измерений
			с.ш.	в.д.	
1	проток	Каньга	46°20'	47°51'	11
2	ильмень	Без названия	46°19'	47°52'	8
3	проток	Дарма	46°16'	47°49'	26
4	ильмень	Балды Кашкан	46°16'	47°44'	11
5	ильмень	Сайкуль	46°16'	47°44'	11
6	ильмень	Балды Кашкан	46°16'	47°38'	12
7	ильмень	Горчиный	46°18'	47°38'	14
8	ильмень	Садовый	46°19'	47°41'	13
9	ильмень	Шушай	46°13'	47°32'	17
10	ильмень	Парпост	46°15'	47°30'	20
11	ильмень	Табу Хурдун	46°12'	47°30'	16
12	ильмень	Уласты	46°11'	47°30'	10
13	ильмень	Семеновский	46°13'	47°47'	8
14	ильмень	Соленая дорога	46°05'	47°40'	13
15	ильмень	Алтата	46°06'	47°20'	5
16	ильмень	Кошата	46°04'	47°14'	8
17	ильмень	Дундук	46°04'	47°21'	10
18	ильмень	Грязный	46°03'	47°30'	13
19	ильмень	Большой Чапчалган	45°59'	47°22'	8
20	ильмень	Газын	45°54'	47°18'	18
21	проток	Хатавинский	45°52'	47°20'	19
22	ильмень	Сурхата	45°49'	47°10'	14
25	проток	Дарма	46°17'	47°55'	20
26	проток	Ножевский	46°14'	47°54'	26
27	проток	Бертюль	46°12'	47°52'	26
28	проток	Алгаза	46°11'	47°50'	22
29	проток	Икрянка	46°06'	47°14'	23
30	проток	Верхний	45°58'	47°38'	25
31	проток	Бирючий	45°57'	47°38'	26
32	проток	Бушма	45°57'	47°37'	26
33	проток	Данилин	45°56'	47°37'	26
34	проток	Копьев	45°56'	47°37'	26
35	проток	Таранхол	45°55'	47°37'	26
36	проток	Три ерика	45°52'	47°36'	23
37	проток	Арбузный	45°52'	47°35'	23

№ п/п	Водный объект	Наименование объекта	Координаты пункта		Количество измерений
			с.ш.	в.д.	
38	ильмень	Япрак	46°15'	47°23'	7
39	ильмень	Бугульчин	46°16'	47°21'	5
40	озеро	Соленое	46°16'	47°22'	6
41	ильмень	Хаптва	46°13'	47°15'	8
42	ильмень	Б.Шикерта	46°10'	47°16'	4
43	озеро	Без названия	46°05'	47°08'	3
44	проток	Кукшин	45°08'	47°11'	10
45	проток	Сахта	45°49'	47°20'	6
46	проток	Каньга	46°20'	47°54'	4
47	проток	Дарма	46°17'	47°52'	11
48	ильмень	Передний Хатын	45°59'	47°10'	5
49	ильмень	Фарпус	46°07'	47°08'	5
50	озеро	Малиновское	46°08'	47°09'	4

емов воды водных объектов при прохождении половодья, а также потери воды на испарение. При этом должна быть оценена роль гидротехнических сооружений и мероприятий по искусственному регулированию пропуска половодья в ЗПИ. Модель устойчивого водообеспечения ЗПИ должна осуществлять функции мониторинга и прогноза пропуска половодья в ЗПИ, воспроизведения сценариев для принятия решений по оптимизации искусственных мер по пропуску половодья. Учитывая большой объём задач, перечисленных в концепции модели устойчивого водообеспечения зоны ЗПИ разработку этой модели следует продолжить в последующие годы.

Рекомендации астраханской группы ИВП РАН по решению проблемы устойчивого водообеспечения ЗПИ

На данном этапе разработана модель водообмена главного магистрального водотока дельты Волги с ЗПИ. Она является основополагающей частью общей модели устойчивого водообеспечения зоны ЗПИ.

Для завершения создания модели устойчивого водообеспечения зоны ЗПИ в последующем требуется выполнить следующие этапы работ в ориентировочной последовательности:

- Создание водно-балансовой модели ЗПИ в целом.

- Выделение отдельных районов для дифференцированной оценки их водного баланса с учётом подводящих к ним (от них) воду водотоков, гидрографических особенностей ЗПИ и водохозяйственных комплексов в них.
- Выявление путей водообмена между выделенными районами с учётом естественной гидрографии и антропогенных мероприятий.
- Создание дифференцированной по районам водно-балансовой модели ЗПИ.
- Разработка модели устойчивого водообеспечения ЗПИ с функциями мониторинга и прогноза пропуска половодья в ЗПИ, воспроизведения сценариев для принятия решений по оптимизации искусственных мер по пропуску половодья.

В итоге будет получена модель для расчёта изменений уровня, площади зеркала воды и составляющих водного баланса ЗПИ, таких как приток (отток) в (из) ЗПИ, изменения объёма наполнения ЗПИ, потери воды на видимое испарение. В процессе увязки водного баланса ЗПИ за определенные промежутки времени, с учётом водохозяйственной деятельности и работы гидротехнических сооружений в них, будут уточняться параметры модели.

Водно-балансовая модель ЗПИ может быть использована для разработки оптимальных сценариев наполнения водой их различных районов (по различным водным трактам). При этом необходимо по прогнозному гидрографу попусков из Волгоградского водохранилища спрогнозировать гидрограф стока в по г/с Верхнее Лебяжье и гидрографы хода уровня воды по г/п Астрахань и (или) г/п Икряное. По этим гидрографам разрабатываются сценарии естественной и искусственной подачи воды в различные районы ЗПИ, из них выбирается оптимальный вариант.

Сформулированный подход к решению проблемы устойчивого обеспечения водой ЗПИ нуждается в значительном уточнении в следующих отношениях:

- Требуется изучить современные проблемы водохозяйственного использования ЗПИ и перспективы его развития.
- Требуется получить уточнённые данные о водных трактах, водозаборах, насосных станциях, шлюзах и дамбах в ЗПИ и режиме их работы и выполнить анализ их целевого назначения, технических возможностей и реального режима работы.

- Требуется построение связей площади зеркала ЗПИ для их различных районов (связанных с различными водными трактами) с уровнями воды в них. Для этого необходимо привлечение имеющихся данных наблюдений за уровнями воды в ЗПИ и данных их космических съёмок и получение новых данных.
- Требуется по новым и уточнённым данным проанализировать динамику водообмена ЗПИ с Волгой и рук. Бахтемиром через соединяющие их водотоки с выявлением роли его искусственного регулирования.
- Необходимо также продолжить полевые работы по рекогносцировочному обследованию гидрографической сети ЗПИ, получению данных для дешифровки их космических изображений, измерению расходов воды в водотоках, соединяющих ЗПИ с главным магистральным рукавом дельты Волги, по измерению уровней воды в различных водных объектах ЗПИ при прохождении половодья и после него. В том числе целесообразно организовать круглогодичные наблюдения за уровнями воды у гидротехнических сооружений и на других объектах в ЗПИ, где постоянно или эпизодически присутствуют работники водохозяйственных служб и местных административных органов.

Экологические проблемы

Рабочая группа по оценке экологического и технического состояния водотоков Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги, включая ЗПИ, изучила сложившуюся ситуацию в дельте Волги и ЗПИ, а также научные материалы и заключения, представленные Институтом водных проблем РАН, и КаспНИИРХ, учитывая реалии сегодняшнего дня, связанные с импортозамещением и обеспечением потребителей отечественной рыбной и сельскохозяйственной продукцией, пришла к выводу, что решение проблем – обводнение территории ЗПИ; воспроизводство рыбных запасов; развитие сельского хозяйства (орошение, заготовка грубых кормов) – возможно только в комплексе, где приоритет отдаётся воспроизводству рыбных запасов, то есть увеличению нерестовых площадей и, как наиболее оптимальному и наименее затратному варианту, восстановлению природных нерестилищ ЗПИ.

Маловодный период в низовьях Волги, начавшийся в середине прошлого десятилетия, продолжается, по крайней мере, до 2017 г.

Так, составленный ещё в 2006 г. долгосрочный климатический прогноз, к сожалению, оправдывается ежегодно уже на протяжении 9 лет (об этом ежегодно докладывается на региональном, межрегиональном, всероссийском и международном уровнях) [3]. Поэтому, считаем, что ориентироваться нужно не на оптимистичный прогноз гидрометцентра (128–161 км³), а на более реальный прогноз центра регистра и кадастра – 72,7 км³. Этому способствует и малый снегозапас в бассейне Волги, и затяжная, холодная весна. Следует отметить (по многолетнему опыту), что все последующие уточнения Гидрометцентра и других служб, как правило, имеют тенденцию к снижению ожидаемых объёмов и уровней.

Запланированные работы по разваловке завалок и дамб – дело, конечно, хорошее, однако, всё равно, большая часть стока Бахтемира проходит транзитом в море потому, что основной сток в ЗПИ в естественных условиях происходил не по водным трактам, а плоскостным стоком (и даже при малой глубине этих проранов, их ширина составляла сотни и тысячи метров, что и обеспечивало большую приточность, при малой скорости потока, что очень важно). Сейчас плоскостной сток практически отсутствует из-за дорог и насыпей, тянущихся вдоль русла Бахтемира. По заключению КаспНИИРХа уже сегодня количество отмелированных нерестилищ восточной части дельты и Волго-Ахтубинской поймы для воспроизводства рыбы частиковых пород недостаточно из-за их неполной заливаемости, резких температурных колебаний и других негативных факторов сложившихся в последние два десятилетия, в то же время десятки тысяч гектаров естественных нерестилищ в ЗПИ, менее подверженных температурным колебаниям, и не требующих для заполнения максимальных объёмов сброса воды с ГЭС, практически не работают.

В настоящее время нет единой стратегии восстановления ЗПИ, частично их используют как водохранилища, водные тракты, в отдельных местах по ломам ильменей строят каналы для орошения, используют под товарное рыбоводство, а часть ильменей переведено в земли сельхозназначения, те же ильмени, что открывают для пропуска воды в период половодья, в большинстве своём не способны пропустить достаточное количество воды и рыбы к нерестилищам, поскольку дамбы убираются не полностью, а русла ериков и

проток, и частью и сами ильмени заросли тростниковыми крепями, начинается массовое заболачивание ильменей и зарастание их болотной растительностью, в большей части тростником и розогом. Работы, проводимые правительством Астраханской области и администрациями районов, ввиду недостаточного финансирования заключаются в частичном вскрытии дамб и дноуглубительных работах, как правило, без расчётов и научного обоснования, что может привести к непредсказуемым последствиям.

При наличии желания, доброй воли и оперативности, местные органы власти могли бы очень эффективно использовать последствия природного явления, характерного для нижней дельты и южной части ЗПИ – это штормовые нагоны. Издавна местные жители прибрежных районов ожидали весенних нагонов, так как благодаря им побережье затоплялось практически пресной северо-каспийской водой, осуществлялся процесс «естественного обводнения» территории, заполнялись и промывались ильмени. К сожалению, сейчас этим никто не занимается, хотя воду требуют все!

Есть такое природное явление на северо-западном Каспии и в южной части ЗПИ, суть его в том, что когда начинается дуть сильный юго-восточный ветер, местное название «морьяна» – вода с моря, пригнанная ветром, начинает подпирать воду в дельте, и ветер начинает гнать воду в ильмени, расположенные в северо-западной части Каспийского моря, от Лагани, до Икрыного [4]. Нагоны – нечастое явление, но они были, есть и будут, в той или иной мере каждую весну и если раньше при нагонах вода беспрепятственно уходила в ильмени, и даже далеко в степь, как было при стихийном ветре в 1953 году, когда вода ушла западнее Лагани на 40 км и размывла железную дорогу Астрахань–Гудурмес, при этом саму Лагань не топило, то сегодня на пути воды, венец природы – человек понавалил немеренное количество дамб, в том числе и как бы защитных, как вдоль Лаганского побережья и теперь та вода, что беспрепятственно проходила мимо, ныне упирается в дамбу и грозит потопить город, как это происходит сегодня. Но речь не о Лаганских проблемах, нагоны были дополнительными циклами промывки и пополнения ильменей между паводками, а в этом году нагон при прогнозируемом низком паводке мог бы подпитать ильмени до прихода паводка, но на пути природы «умные» сооружения человека. Вот дамба постро-

енная в 1958 г. при строительстве дороги Астрахань–Лиман, перекрывающая почти 200 метровую ширину протоки Садовка, в то время рыбы было с избытком и о ильменах никто не думал, мосты не строили, строителей не остановило даже то, что на месте дамбы находилась тоня, с говорящим названием «Золотая».

Пока не было этой и следующих дамб вода в паводок и при нагонах доходила до крайних ильменей в течение трёх суток, сегодня загаженные дамбами и заросшие высокой жёсткой растительностью ерика и протоки уже не способны пропускать необходимый объём воды, а где способны, там на пути воды стоят чиновники, как у нас в Лиманском районе, на словах, они не враги природе, а на деле, чтобы отвоевать у них проточный ильмень, уходят годы.

А вот уже набившая всем оскомину ильмень Малая Чада. Сколько лет идёт битва за пропуск воды через ильмень, и, кажется, конец близок, но даже проиграв все суды, колхоз им. Чкалова, при попустительстве и поддержке районной администрации, делает всё от него возможное, чтобы вода прошла через ильмень в минимальных объёмах, невзирая на требования двух отдельных судебных решений. Мало того, что дамба должна быть убрана по ширине 30 метров и до дна, то есть минимум на метр ниже трубы, по факту ширина убранного куска дамбы ровно 20 метров, так она ещё и выше воды в ерике на 40 см. (рис. 1).

Вот так! ...«После нас хоть потоп» – эти слова маркизы Де Помпадур стали лозунгом нынешних руководителей Лиманского района, как использовать богатство ильменей и какие в них богатства им похоже непонятно. А жаль. В ЗПИ необходимо провести весь комплекс мелиоративных работ, ликвидацию бесхозных дамб и выкос жёсткой растительности, очистку русел ериков и проток от накопившегося ила и корневищ тростника и рогоза, то есть обеспечить максимальный пропуск воды и открыть пути миграции рыбы на нерест. Такие работы в Астраханской области может проводить только ФГБУ «Управление вододельителя и нерестилищ», имеющее в своём арсенале весь комплекс необходимой техники.

Поскольку официальной информацией о гидрометеорологической и экологической обстановке по всему Волжско-Камскому бассейну и по Нижней Волге, в частности, располагает только Гидрометслужба РФ, считаю крайне необходимым и важным в состав



Рис. 1. Нагонная вода прорывается через частично убранную дамбу. Фото В.П. Андросова

Общественного экологического совета включить руководителя, в крайнем случае его представителя, местного органа Гидрометеорологической службы (АЦГМ) и обеспечить его присутствие на всех заседаниях Общественного экологического совета.

В краткосрочной перспективе в качестве пилотного проекта возможно восстановление ильменей и водотоков в Лиманском районе, в том числе и бывших федеральных прудов, фактически осушенных и обвалованных дамбами природных ильменей, и основываясь на наблюдениях за экологическим состоянием восстановленных водоёмов и расчётов экономической целесообразности планировать дальнейшее ведение работ по восстановлению ЗПИ. Однако тогда было подготовлено научное обоснование, и Лиманский районный суд признал законными требования Лиманской прокуратуры к колхозу им. Чкалова по ст. 10 п. 6 Водного кодекса РФ:

Статья 10. Прекращение права пользования водными объектами.

Пункт 6. При прекращении права пользования водным объектом водопользователь обязан:

- прекратить в установленный срок использование водного объекта;
- обеспечить консервацию или ликвидацию гидротехнических и иных сооружений, расположенных на водных объектах, осуществ-

вить природоохранные мероприятия, связанные с прекращением использования водного объекта.

Так что прецедент уже имеется, и с такими нарушениями Водного кодекса РФ можно и нужно бороться! В долгосрочной перспективе восстановление и мелиорация нерестилищ, кроме своей основной задачи воспроизводства рыбных запасов, поможет решить такие важные проблемы, как обводнение ЗПИ, заготовка грубых кормов и увеличение пастбищ для КРС на заливных лугах.

Заключение: современные проблемы и задачи ЗПИ

Разработанные Астраханской группой ИВП РАН рекомендации по решению проблемы устойчивого водообеспечения ЗПИ используются в практической работе сотрудниками Астраханской региональной службы природопользования при проведении работ по мониторингу водохозяйственной обстановки.

Важное место в данной работе занимают мероприятия по обследованию зоны ЗПИ. В результате установлены факты наличия несанкционированных завалок, дамб и перемычек, а также приняты меры по их устранению.

К примеру, на ильмене Беркута Наримановского района и ильмене Кура Лиманского района выявлены земляные дамбы, препятствующие поступлению воды в ильмени далее по трактам. Незаконные завалки водных объектов ликвидированы, доступ воды восстановлен.

На озере Шерстак Лиманского района установлено наличие четырёх несанкционированных завалок, затрудняющих доступ воды из ильменя Большой Гашун в ильмень Задний Хатын и далее в водные объекты в границах населённого пункта с. Караванное Лиманского района Астраханской области. По сведениям районной администрации, данные завалки незаконно возведены пользователем рыбноводного участка. Для принятия мер реагирования и рассмотрения вопроса о привлечении виновных лиц к административной ответственности материалы направлены в Управление Росприроднадзора по Астраханской области и ВКТУ Росрыболовства. Работы по мониторингу зоны ЗПИ и выявлению нарушений природоохранного законодательства продолжаются.

В период с 31 января по 21 апреля 2017 г. Службой природопользования и охраны окружающей среды Астраханской области совместно с представителями Нижне-Волжского бассейнового водного управления и Управления эксплуатации Волгоградского водохранилища, при участии органов местного самоуправления Наримановского, Икрянинского, Лиманского районов были проведены комиссионные обследования 77 акваторий водных объектов зоны ЗПИ и 38 объектов охотхозяйств зоны ЗПИ. В ходе проведения обследований зоны ЗПИ службой в 2017 г. был выявлен ряд нарушений законодательства на водных объектах в зоне ЗПИ.

При использовании ильменя Малый Ницанский были выявлены нарушения, связанные с незаконным изъятием грунта для возведения завалки на ильмене, забором водных ресурсов из данного ильменя без разрешительных документов, осушением водного объекта, а также загрязнением земель мусором и нефтепродуктами. За нарушение правил охраны среды обитания объектов животного мира виновное лицо привлечено Службой к административной ответственности. Материалы для принятия мер в рамках полномочий направлены в управление Росприроднадзора по Астраханской области, управление Росреестра по Астраханской области, Волго-Каспийское территориальное управление Росрыболовства с целью рассмотрения вопроса о расторжении договора пользования рыбноводным участком. Управлением Росприроднадзора по Астраханской области возбуждены административные дела, рассчитан ущерб на сумму 594 тыс. рублей. Материалы также направлены в органы прокуратуры для возбуждения уголовного дела.

Выявлены факты возведения несанкционированной завалки на водном объекте ерик Мошка Лиманского района Астраханской области и осушения водного объекта – ильмень Малый Руснур Лиманского района Астраханской области, а также создания земляного вала, полностью преграждающего русловую часть ерик Бешенный, незаконной завалки на ильмене Большой Руснур. Материалы направлены в Управление Росприроднадзора по Астраханской области, в Управление Росреестра по Астраханской области, в Управление Россельхознадзора по Ростовской, Волгоградской и Астраханской областям и Республике Калмыкия. Незаконные завалки водного объекта ликвидированы, доступ воды восстановлен.



Рис. 2. Очередная несанкционированная завалка

Управлением Росприроднадзора по Астраханской области рассматриваются вопросы о возбуждении административных дел (рис. 2).

В целом в результате проведённых работ в зоне ЗПИ было вскрыто 32 завалки: 6 в Наримановском районе, 8 в Икрянинском районе, 18 в Лиманском районе. Осуществлён выкос водной растительности на ильмене Япрык Наримановского района. Через 3 шлюза-регулятора на ериках Дарма, Малая Дарма, Солянка продолжается заполнение водных объектов Дарминской системы: со стороны Дармы и Малой Дармы до ерика Мартышка – водонаполнение 50%, ерик Красная протока – водонаполнение 70–80%, водных объектов Ножовской системы – ерик Ножовский – ерик Бертюль до Прикаспийской оросительно-обводнительной системы – водонаполнение 60%.

Водонаполнение ильменей Бунтур, Таби Хурдун, Малый и Большой Табунный, ильмень речка-Табун, ильмень Юлаль и далее по водным трактам Икрянинского и Наримановского районов – 50–60%, ильменей Большой Карабулак – ильмень Культюкун и далее по трактам – 80–90 %, ильмени Шауча, Харнур и далее по трактам – 50–60%, ильмени Большая и Малая Чада, ильмень урочище Кобел, ерик Глинкогинский и далее по трактам – 50%.

Заполнение водных объектов зоны западных подступных ильменей продолжается, ведется мониторинг ситуации [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Синенко А.Г., Баринов А.И., Бухарицин П.И. Современная гидрологическая изученность района Западных подступных ильменей. Материалы научно-практической конференции «ООПТ Нижней Волги как важнейший механизм сохранения биоразнообразия: итоги, проблемы и перспективы». Волгоград, 2010. С. 213–218.

2. Бухарицин П.И., Полонский В.Ф., Остроумова Л.П., Синенко А.Г. Моделирование водообеспеченности района западных подступных ильменей в условиях разной водности Волги. Материалы научно-практической конференции «Современное состояние водных ресурсов Нижней Волги и проблемы их управления» (18–19 ноября 2009 г., г. Астрахань). АГУ, КаспНИРХ, АГТУ. Астрахань, 2009. С.39-44.

3. Бухарицин П.И., Андреев А.Н. Ритмы солнечной активности и ожидаемые экстремальные климатические события в Северо-Каспийском регионе на период 2007–2017 гг. Труды Международной научной конференции «Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе» (Москва, 19–20 октября 2006 г.). М., 2006. С. 137–143.

4. Бухарицин П.И., Синенко А.Г., Кабдулова Р.Р. Штормовые нагоны в устье Волги. Научно-технический журнал АГУ Геология, география, глобальная энергия. №2 (37), 2010. С. 106–109.

КАЧЕСТВО ВОД СУШИ И ГИДРОЭКОЛОГИЯ

Экологотоксикологические исследования и моделирование качества водных ресурсов юга России

А.М. Никаноров, Т.А. Хоружая, Б.Л. Сухоруков, Е.Н. Бакаева

В течение многих лет под руководством член-корр. РАН А.М. Никанорова проводятся исследования Гидрохимического (Южного) отдела ИВП РАН на водоёмах и водотоках Ростовской, Волгоградской областей, Краснодарского края и выполняются в сотрудничестве с ФГБУ «Гидрохимический институт» Росгидромета. В число изучаемых водных объектов входят большие и малые реки, а также крупные водохранилища бассейна реки Дон в нижнем течении.

Выполнены теоретические исследования внутриводоёмных процессов, динамики формирования качества вод водных объектов юга России (включая крупные водохранилища); экспедиционные полевые работы, в том числе на судах; экспериментальные исследования на основе натурного моделирования загрязнения водных экосистем на мезокосмах; анализ материалов многолетних наблюдений Росгидромета по физико-химическим и биологическим показателям.

Многолетние тенденции изменений состояния цимлянского, пролетарского и веселовского водохранилищ по химико-биологическим и токсикологическим показателям.

Цимлянское водохранилище является одним из крупных водохранилищ Российской Федерации. Оно создано в 1952 г. в нижнем течении реки Дон. Расположено на территории Волгоградской и Ростовской областей и имеет большую эколого-экономическую значимость: является важнейшим звеном технической водохозяйственной схемы бассейна Дона, используется для управления водными ресурсами и качеством воды в бассейне Нижнего Дона.

Химическое загрязнение водохранилища стабильно держится на уровне 3–4 классов качества вод – «воды загрязнённые–грязные». Анализ многолетних данных по интегральному показателю химического загрязнения – удельному комбинаторному индексу загрязнения вод (УКИЗВ) (используемому в мониторинге Росгидромета для общей оценки загрязнённости) позволил проследить простран-

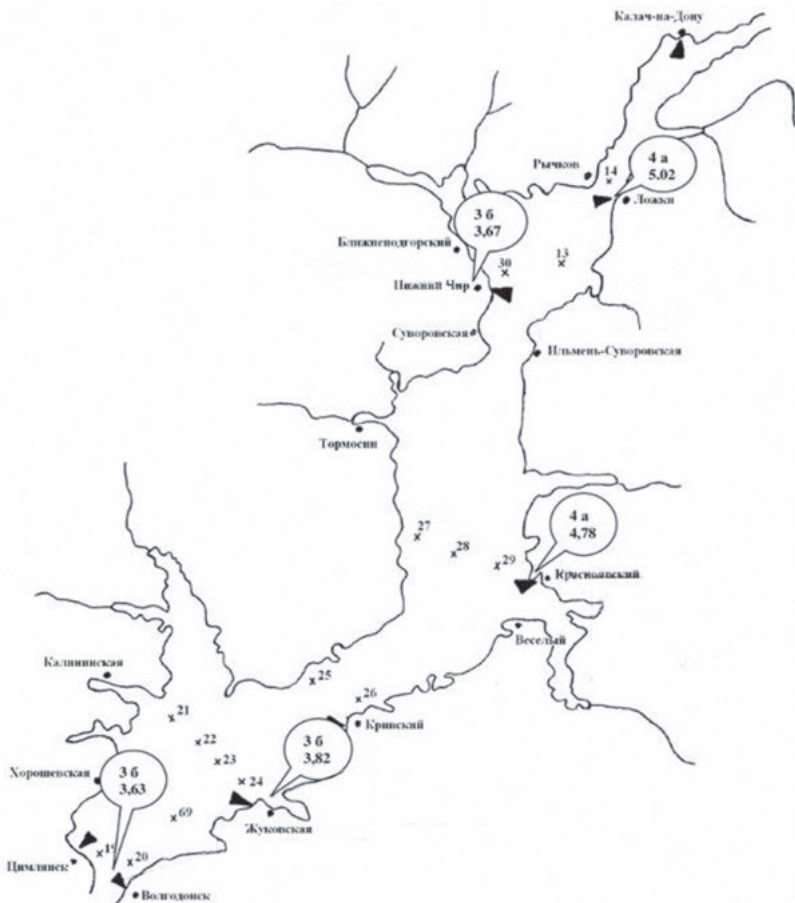


Рис. 1. Характеристика химического загрязнения Цимлянского водохранилища по индексу УКИЗВ

ственные тенденции изменений по численным величинам УКИЗВ и классам качества воды (рис. 1).

Важной проблемой водохранилища, наряду с загрязнением, является цветение воды вследствие интенсивного развития водорослей; оно затрудняет его народно-хозяйственное использование, а иногда даже приводит к чрезвычайным ситуациям в водоснабжении. В этой связи особое внимание в исследованиях было уделено фитопланктону – первому трофическому звену водной экосистемы.



Рис. 2. Распределение токсичных видов синезелёных водорослей по акватории Цимлянского водохранилища (по данным режимного мониторинга за 1984–92 гг.)

По результатам наших многолетних исследований Цимлянского водохранилища сделан вывод, что практически ежегодно на водохранилище наблюдается сильное цветение воды вследствие интенсивного развития водорослей. Межгодовые флуктуации в развитии фитопланктона вполне закономерны для Цимлянского водохранилища; сезонность, как и во всех водохранилищах умеренного климата

та, хорошо выражена. Благоприятную обстановку для развития фитопланктона, определяют особенности гидрометеорологических условий Цимлянского водохранилища и обеспеченность биогенными веществами.

Временные тенденции изменений выражаются в изменении соотношения между систематическими отделами фитопланктона, нарушении смены массовых форм и сезонных планктонных комплексов. В 1970–80-е гг. на протяжении всего вегетационного периода наблюдалась интенсивная вегетация двух доминирующих видов синезелёных: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*. Эти и другие виды отличаются способностью образовывать токсины, т.е. считаются «токсичными». Позже фитопланктон проб, отобранных в экспедициях ИВП РАН, (2009–12 гг.), характеризовался преобладанием синезелёных именно «токсичных» видов при большем их разнообразии: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Oscillatoria limnetica*, *Anabaena flos-aquae*. Наибольшая доля их отмечена в центральной части водохранилища (у х. Красноярский и ст. Жуковская), иногда в верхней части (у пгт Нижний Чир) (рис. 2). В отдельные годы здесь они были экстремальными, достигая 896,8 мг/дм³ и 85 090 тыс. кл/дм³ соответственно. Доля синезелёных водорослей в общей численности фитопланктона составляла 60–90%.

Токсины синезелёных опасны не только для водной экосистемы, но и для здоровья населения (вода Цимлянского водохранилища используется для питьевого водоснабжения). Следует отметить, что, к сожалению, режимный мониторинг Росгидромета по гидробиологическим показателям, в том числе контроль синезелёных, был ограничен всего несколькими годами (1984–92 гг.) и в настоящее время не проводится. Комплексные экспедиции ИВП РАН позволили хоть частично восполнить пробел, что необходимо для оценки современного эколого-токсикологического состояния Цимлянского водохранилища.

Пролетарское и Веселовское водохранилища входят в Маньчскую водохозяйственную систему, представляющую собой каскад русловых водохранилищ, построенных в период 1932–36 гг. на реке Западный Маньч в бассейне Дона [5]. По морфометрическим показателям водохранилища значительно уступают Цимлянскому. Создание водохранилищ способствовало решению ряда важных хозяйственных задач обеспечения территорий водными ресурсами.

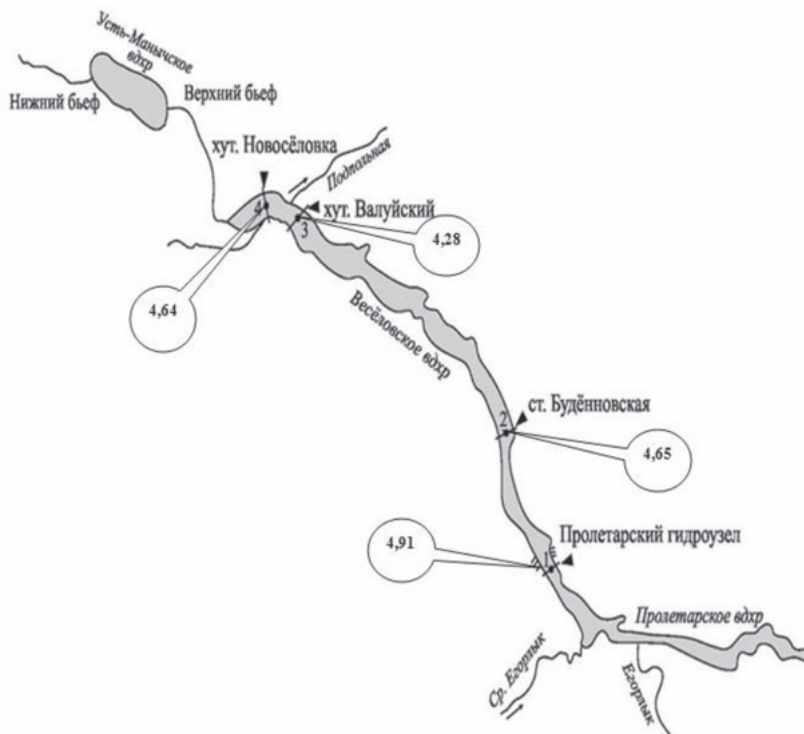


Рис. 3. Характеристика химического загрязнения Усть-Манычских водохранилищ по индексу УКИЗВ

Химические показатели. Водохранилища, особенно восточная часть Пролетарского, отличаются повышенным уровнем содержания в воде минеральных солей, что связано с их геологическим происхождением и расположением в зоне солонцеватых почв. Менее минерализована вода Веселовского водохранилища. Наиболее высокие значения минерализации отмечались ниже ст. Буденновской, меньшие – в приплотинной части у хут. Новоселовка [2]. Качество воды Веселовского водохранилища оценивается по комплексу показателей чаще всего как «грязная» (4а класс).

При более детальном рассмотрении загрязнённости по УКИЗВ установлены пространственные изменения по пунктам наблюдений состояния экосистем водохранилищ за многолетний период (рис. 3). Впервые найдены различия в загрязнённости по межгодовой про-

странственной динамике численных величин УКИЗВ (Сочи). Использование численных значений УКИЗВ (максимальным, медианам и средним) позволило установить снижение уровня загрязнённости к створу хут. Валуийский (рис. 3), что соответствует данным о постепенном снижении содержания солей, особенно сульфатов и хлоридов, вниз по течению [2].

Биологические показатели. Экологическая ситуация по интегральным биологическим показателям в целом по водохранилищам в последние годы (2014–15 гг.) существенно не изменилась по сравнению с предшествующим периодом наблюдений. Трофность (по фитопланктону) варьировала по пунктам от олиго- до мезотрофной с преобладанием последней. Интенсивность «цветения» (по биомассе водорослей), как и ранее, была незначительной, слабой или умеренной. Значения индекса сапробности (ИС) по фито- и зоопланктону варьировали в пределах II–III классов качества воды (вода «слабо загрязнённая» – «загрязнённая»). Однако отмечены определённые изменения структуры сообщества фитопланктона Веселовского водохранилища. Так, ранее наблюдавшаяся монодоминантность (по численности и биомассе) наблюдалась редко, что указывает на тенденцию улучшения состояния первого трофического звена и, соответственно, всей водной экосистемы. Однако, обращают на себя внимание негативные тенденции: после 2010 г. начал расти вклад сине-зелёных в сообщество, более того, стали встречаться виды, которые могут быть потенциально «токсичными».

Нельзя не упомянуть о том, что после 2011 г. программы наблюдений Росгидромета претерпели существенное сокращение. Экспедиции, проведённые Гидрохимическим отделом ИВП РАН, позволили в определённой мере восполнить недостаточность гидробиологической информации государственного мониторинга Росгидромета. Сокращение приводит к потере ценной биологической информации, необходимой для анализа экологического состояния водохранилищ сегодня и в будущем. [1].

Оценка токсичности вод водохранилищ по данным биотестирования

Впервые на основе использования стандартных методов биотестирования (на ракообразных, водорослях, рыбах) дана пространственно-временная характеристика токсичности вод Цимлянского,

Пролетарского и Веселовского водохранилищ. Результаты позволяют предполагать возможную роль синезелёных водорослей (они играют ведущую роль в альгоценозах Цимлянского водохранилища), в формировании токсических свойств воды [3]. В то же время вопрос о причинах токсичности Усть-Маньчских водохранилищ, которая имеет нерегулярный характер во времени и пространстве, пока не ясен. [4].

Таким образом, на основе результатов экспедиционных работ ЮО ИВП РАН и анализа информации мониторинга Росгидромета выявлен ряд пространственно-временных особенностей эколого-токсикологического состояния крупных водохранилищ бассейна Дона: Цимлянского, Пролетарского и Веселовского. Сравнительной оценке их эколого-токсикологического состояния посвящена публикация [5].

На примере данных по Цимлянскому и Усть-Маньчским водохранилищам показано, что приоритетными для использования в мониторинге являются химические показатели, поскольку они являются методами выполнения измерений (МВИ) и внесены в Федеральный реестр МВИ. Биологические индексы весьма разнообразны, но имеют ряд недостатков, связанных в основном с субъективными оценками. Результаты исследований указывают на перспективность использования в научных исследованиях и в мониторинге поверхностных вод, помимо оценки классов качества вод, численных значений величин УКИЗВ, с целью детализации динамики загрязнённости.

Данные по водохранилищам легли в основу рекомендаций по методам оценки токсического влияния фитоценозов планктона на формирование качества ПВС. для наблюдательной сети Росгидромета [6]. Для специалистов в области мониторинга загрязнения и состояния водных объектов и экологов широкого профиля предложены методические подходы с использованием классификаций качества природных вод [7].

Российские технологии экологической оценки состояния поверхностных водных объектов, основанные на биотестировании токсичности, были представлены для обсуждения украинским специалистам [8].

Оценка и нормирование эколого-токсикологического состояния и загрязнения пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей.

Разработаны принципы оценки состояния экологического благополучия и выявления неблагополучия водохранилищ Южного региона России [9]. Наибольший интерес вызывает формулировка и ранжирование критериев относительно удовлетворительного состояния водных объектов на основе показателей, характеризующих ненарушенное или почти ненарушенное естественное состояние водных экосистем с целью их сохранения. Предполагается использовать для этой цели документ, подготовленный совместно с ФГБУ «ГХИ» [10].

Материалы по использованию нормативов химико-биологических показателей для выявления состояний экологического благополучия водных объектов на основе ранжирования нарушений действующих нормативов ПДК и измерений биологических характеристик и индексов (на примере многолетней информации государственного мониторинга по Цимлянскому и Маньчским водохранилищам.) были рассмотрены и рекомендованы к внедрению в практику мониторинга на Секции рыбохозяйственных нормативов ПДК и ОБУВ НТС ФГБУ «ЦУРЭН» (5 октября 2016 г.).

Результаты анализа экологического благополучия и установления статуса экологического благополучия Цимлянского и Усть-Маньчских водохранилищ по химическим, токсикологическим (биотестовым) и гидробиологическим показателям опубликованы в статьях, подготовленных совместно с ФГБУ «ГХИ» по материалам режимного мониторинга и экспедиционных исследований ИВП РАН [1,11].

Разработка теоретических основ мониторинга внутриводоёмных процессов по дистанционной спектрометрической информации

Направление, связанное с разработкой теоретических основ изучения внутриводоёмных процессов по данным дистанционных спектрометрических измерений в видимом диапазоне длин волн, вошло в перечень приоритетных со времени создания Южного отдела ИВП РАН с 2000 г. За последние десятилетия эта формулировка (теоретические основы) была уточнена по объективным причинам:

- произошёл качественный скачок в развитии измерительной (в том числе спектрометрической) техники во всём мире;

- при прямой поддержке руководителя работ, А.М. Никанорова, с приобретением портативного спектрометра видимого диапазона S41 фирмы LaserLS (совместно с ГХИ) появилась возможность самостоятельно собирать спектрометрическую информацию на водных объектах Юга России по несколько раз в различные гидрологические сезоны в течение календарного года;
- появилась возможность проведения натуральных экспериментов с формируемыми (искусственно организованными) внутриводоёмными процессами в модельных водных экосистемах – мезокомах;
- появилась возможность собирать «опорную информацию» – определять концентрации видимых (оптически активных) компонентов (ВК) в параллельно со спектрометрической съёмкой отобранных проб воды стандартными аналитическими методами.

Таким образом, появилась возможность проверять теоретические выводы о внутриводоёмных процессах, используя оригинальные экспериментально полученные данные дистанционных спектрометрических измерений. Кроме того, качество получаемых спектрометрических данных позволило сравнивать их с данными, публикуемыми в зарубежных периодических изданиях и использовать для разработки фундаментальных основ формирования спектров восходящего от воды излучения. Ниже изложены основные результаты работ по этому направлению.

На основе теории светорассеяния разработана модель расчёта спектров коэффициентов яркости (СКСЯ) восходящего от воды излучения. Необходимость создания такой модели очевидна. Она даёт возможность понять механизм формирования сигнала, регистрируемого при пассивном дистанционном зондировании водных объектов (ВО). При фиксированных геометрических условиях съёмки и учёте аддитивности показателей поглощения и рассеяния, выражение для СКСЯ следующее:

$$\rho_{\lambda}(\sigma, \alpha) = \Sigma_{\lambda}(\sigma, \alpha) / K_{\lambda}(\sigma, \alpha), \quad (1)$$

$$\Sigma_{\lambda}(\sigma, \alpha) = \sigma_{\lambda, \text{МВ}}^i \text{СМВ} + \sigma_{\lambda, \text{ФП}}^i \text{СФП} + \sigma_{\text{воды}}^i \quad (2)$$

$$K_{\lambda}(\sigma, \alpha) = [\alpha_{\lambda, \text{МВ}} + (1 - \Phi_{\lambda, \text{МВ}}) \sigma_{\lambda, \text{МВ}}] \text{СМВ} + [\alpha_{\lambda, \text{ФП}} + (1 - \Phi_{\lambda, \text{ФП}}) \sigma_{\lambda, \text{ФП}}] \text{СФП} + 0,5 \sigma_{\lambda, \text{воды}} + \alpha_{\lambda, \text{воды}} + \alpha_{\lambda, \text{РОВ}} \quad (3)$$

Здесь $\alpha_{\lambda,i}$, $\sigma_{\lambda,i}$, $\alpha_{\lambda,i}^{\gamma}$ – удельные по концентрации показатели поглощения, рассеяния и рассеяния на угол γ частиц сорта i на длине волны λ , СМВ, СРОВ, СФП, – концентрации минеральных взвешенных (мв), растворённых органических (ров) веществ и фитопланктона (фп) соответственно, $\Phi_{\lambda,i}$ – интеграл от индикатрисы рассеяния, который воспроизводит долю света рассеянного в заднюю полусферу частицами сорта i . [12,13].

При ограниченном объёме экспериментальных СКСЯ возможно получать практически неограниченный массив СКСЯ с известными «опорными данными», входящими в качестве исходных данных в уравнение (3). Наличие такого массива СКСЯ позволяет выполнить большой объём модельных расчётов и, в результате, предложить новый подход к интерпретации дистанционных данных. Ранее интерпретация таких данных заключалась в построении биооптических моделей, связывающих концентрации ВК с величиной КСЯ в красной области спектра на двух или трёх длинах волн: 675, 705 нм, или 670, 710, 740 нм. В наших работах была высказана гипотеза о том, что СКСЯ (именно спектры во всём видимом диапазоне длин волн) несут в себе информацию об интегральных свойствах водной экосистемы и для понимания процессов, происходящих в водных экосистемах, необходимо использовать весь видимый диапазон спектра. Был предложен метод пространства оптических образов (ПОО).

ПОО строят на основе всевозможных экспериментальных СКСЯ видимой области электромагнитного спектра. Для получения ПОО со статистически устойчивыми свойствами, экспериментальные СКСЯ дополняют модельными спектрами [14,15], рассчитанными на основе теории переноса. Математически требование дополнения общего массива базисных экспериментально измеренных СКСЯ модельными необходимо для создания пространства с устойчивыми статистическими параметрами ПОО.

Для построения ПОО используют все имеющиеся экспериментальные СКСЯ и несколько тысяч модельных.

В общем случае, ПОО n -мерное. Реально его размерность определяется количеством каналов спектрометра: 512 или 1024. Но визуализация внутриводоёмных процессов возможна при построении траектории этого процесса в привычном для восприятия объёмном трёхмерном представлении.

Используя известные методы сжатия информации массив экспериментальных и модельных СКСЯ без значительной потери информации преобразуют в трёхмерный с обобщёнными координатами (ОК) ОК1, ОК2, ОК3. Три обобщённые координаты описывают более 90% дисперсии СКСЯ. Соответственно, считая, что форма СКСЯ связана и (или) определяется состоянием водной экосистемы, последовательное изменение формы СКСЯ в ПОО фактически является траекторией внутриводоёмного процесса ВО [16-18].

Кроме придания устойчивости ПОО, модельные СКСЯ, рассчитанные на основе известных спектров показателей поглощения и рассеяния при известных концентрациях видимых компонентов, позволяют построить изоплеты показателя поглощения фитопланктона $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$ с известными $C_{\text{ХЛ}}$, $C_{\text{МВ}}$ и в этом, проградуированном изоплети ПОО, траектория изменения состояния водной экосистемы легко интерпретируема.

Проверка эффективности метода ПОО была проведена в экспериментах с модельными водными экосистемами – мезокосмами, организованными совместно с сотрудниками ГХИ [19]. Детальное рассмотрение вопросов, связанных с динамикой естественных и модельных водных экосистем, представлено в монографии [20] Параллельно протекающие в мезокосмах экосистемные процессы, отчетливо отражаются в СКСЯ и, дают возможность исследовать информативность дистанционных спектрометрических данных [21].

Используя метод ПОО были получены результаты, указывающие на цикличность внутриводоёмных процессов при большой, но разовой нагрузке загрязняющих веществ на экосистемы мезокосмов. При этом в экосистемах возникает краткопериодичный циклический процесс, т.е. искусственные экосистемы эвтрофного водоёма, подвергшиеся разовой нагрузке обладают достаточной самоочищающей способностью для возврата в естественное состояние. Этот процесс самоочищения оказывается смещённым относительно данных, полученных химическими методами (определение концентраций в воде загрязняющих веществ) на 4–6 суток. Постоянное же воздействие загрязняющих веществ в течение 16 дней не позволяет экосистеме возвратиться в естественное состояние. Во всяком случае, в течение 10 суток после прекращения внесения загрязняющих

веществ, возврат в «начальную» область не был зарегистрирован. Все эти процессы отчётливо отражаются в ПОО.

Аналогичный циклический процесс в ПОО наблюдали и в экосистеме реки Дон по оптическим данным в течение лета–осени 2001 г. [22–24]. Один из наиболее ярких результатов, демонстрирующих эффективность данных дистанционной спектрометрии, получен в эксперименте с модельными водными экосистемами в 2009 г.

В таблице приведены условия нагрузки мезокосмов в натурном эксперименте.

Номер мезокосма	Концентрации Cd ²⁺ , мкг/дм ³	Количество ПДК (р/хоз)	Режим и сроки внесения, сут.
1	не вносили	0	не вносили
2	25	5	однократно в 1-е сутки
3	375	5+5+5+...+5=75	многократно (по 5 ПДК в течение 15 сут.)
4	50	10	однократно в 1-е сутки
5	125	25	однократно в 1-е сутки
6	250	50	однократно в 1-е сутки

ПДК кадмия 5 мкг/дм³

СКСЯ регистрировали ежедневно (за исключением отдельных дней, когда по техническим условиям съёмка представлялась невозможной) в течение всего времени эксперимента около 28 суток. На рис. 4 представлен график изменения обобщённой координаты ОКЗ, максимально коррелирующей с концентрацией фитопланктона для всех мезокосмов и материнской экосистемы [22].

Начиная с 3-их суток, траектории ОКЗ экосистем мезокосмов начинают незначительно различаться и «расходиться». Заметно это различие проявляется начиная с 9 суток эксперимента. Максимальные отличия возникают на 23 сутки. Затем траектории оптического образа экосистем показывают тенденции к сближению.

Такое поведение экосистем, изначально имеющих приблизительно одинаковый биохимический состав и практически одинаковое значение ОКЗ до внесения токсического загрязнения, вполне объяснимо. На начальном этапе, в первые сутки эксперимента, экосистемы подверглись существенно различному внешнему воздействию. Биота экосистем различно прореагировала на это воздействие, про-

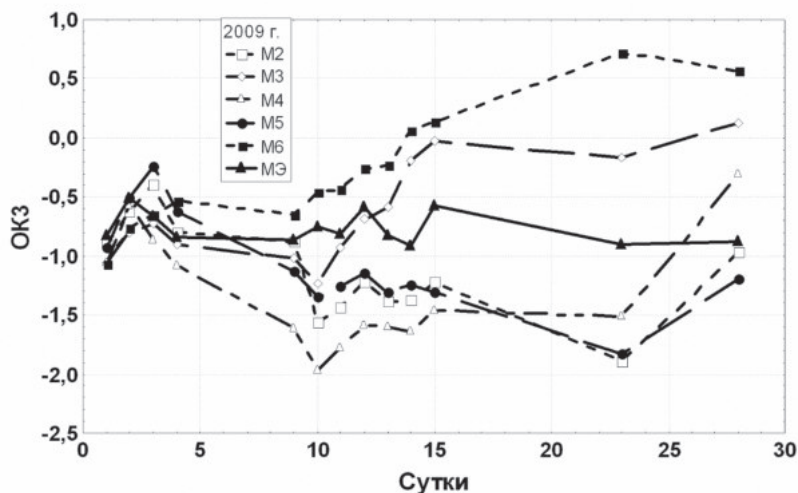


Рис. 4. Траектории ОКЗ по данным дистанционной спектрометрической съёмки натурального эксперимента 2009 г.

цессы саморегулирования в каждой экосистеме пошли с различной интенсивностью. Экосистемы, 3-го и 6-го мезокосма начали погибать. Экосистемы 2-го, 4-го и 5-го мезокосмов наоборот, восприняли это загрязнение как стимулирующий фактор, что привело к бурному развитию планктона. Особо можно выделить поведение ОКЗ 4 мезокосма. Интенсивное развитие фитопланктона в нем отмечено уже на 4-е сутки эксперимента, достигает максимума на 10 сутки и затем отмечается медленное затухание развития экосистемы, приведшее к её угнетению, нарушению экосистемных связей в заключительной фазе эксперимента после 23 суток. Причина заключается, по-видимому, в истощении питательной базы планктона за счёт замкнутости и ограниченного объёма мезокосмов. Причем заметное угнетение наблюдается и у экосистем мезокосмов 2 и 5 после 23 суток, что проявляется в изменении их траекторий в направлении, противоположном развитию, тогда как траектория материнской экосистемы хотя и испытывает незначительные колебания, но даже в заключительной фазе значение ОКЗ остаётся на уровне начала эксперимента и не показывает тенденций к какому-либо направленному изменению.

Пролонгированная нагрузка экосистемы 3-го мезокосма приводит к заметному угнетению развития планктона и приближению траектории этого мезокосма к траектории ОКЗ экосистемы 6-го мезокосма, подвергнувшегося изначально шоковому воздействию токсиканта.

Такое поведение ОК экосистем мезокосмов на качественном уровне вполне ожидаемо и укладывается в рамки фундаментальных представлений о развитии экосистем – понимания механизма их гомеостаза и саморегуляции. По рис. 4 гомеостатическое плато всех экосистем находится в пределах траектории материнской экосистемы в районе ОКЗ=-1 по шкале ОК. Траектория первого мезокосма, не подвергнувшегося загрязнению, находится вблизи этого плато. Более сильное загрязнение вызывает положительную обратную связь, невысокое загрязнение – отрицательную. Следует обратить внимание на то, что на заключительной стадии эксперимента экосистемы всех мезокосмов имели тенденцию к угнетению и, возможно, гибели за счёт истощения их питательного ресурса.

Таким образом, на данных дистанционных спектрометрических измерений в натуральных экспериментах показано, что высокие (порядка 250 мкг/дм³ и более) разовые или невысокие (около 25 мкг/дм³), но пролонгированные нагрузки приводят к нарушению экосистемных связей, ведущих к угнетению и возможной гибели экосистемы на ранней стадии воздействия токсиканта на водную экосистему.

Невысокие разовые нагрузки стимулируют развитие экосистем, но на заключительной стадии экосистемы мезокосмов гибнут за счёт исчерпания ресурса питательных веществ, причём тем быстрее и сильнее, чем более интенсивный всплеск их развития наблюдается на начальном этапе эксперимента. Время латентного периода достигало от 4 до 9 суток в зависимости от нагрузки мезокосмов, причем однозначной зависимости этого периода от величины нагрузки не отмечено.

При изучении поведения дистанционно зарегистрированных СКСЯ представленных в виде обобщённых координат можно делать выводы о направленности внутриводоёмных процессов, происходящих в экосистемах мезокосмов. При этом, если контролировать состояние экосистемы по концентрации загрязняющего вещества внутри-водоёмные процессы в экосистемах зафиксировать невозможно.

Обобщая результаты измерений различных показателей, определяемых традиционными химическими методами, и результатов полученных методами дистанционной спектроскопии пришли к выводу, что при разовых воздействиях, порой чрезвычайно сильных, наблюдается возврат экосистем в начальное состояние динамического равновесия при запаздывании реакции экосистемы на внешнее воздействие от самого воздействия (естественного или антропогенного). Это явление, наблюдавшееся как в природных, так и в модельных водных экосистемах, названо экологическим гистерезисом [24].

Параллельно с развитием теоретической базы метода дистанционной спектроскопии проводились экспериментальные работы по изучению спектральных свойств водных объектов юга России. Результат работ – руководящий документ по проведению дистанционной спектроскопической съемки с мостовых переходов спектрометром S41 [25].

Начиная с 2009 г. и по настоящее время проводится регулярная съёмка реки Дон ниже Ростова на-Дону (периодичность около 15 дней). Проводились съёмки Цимлянского водохранилища, рек Волга, Кубань. Накопленные СКСЯ совместно с опорными данными, основной из которых Схл а фитопланктона, позволили перейти к обобщению и систематизации экспериментально полученных данных. В результате для продуктивных ВО Юга России выделено 6 категорий СКСЯ и установлена связь между формой СКСЯ и трофическим статусом ВО. Перспективность подхода заключается в возможности оценки трофического статуса ВО или его части в реальном времени, буквально, во время проведения съёмки. Кроме того, этот подход может быть использован при интерпретации космической информации получаемой гиперспектральной аппаратурой. (Ресурс-П, ГСА). Сопоставление СКСЯ нижнего уровня со спутниковым служит прямой проверкой качества спутниковых данных, которые проходят геометрическую и атмосферную корректировку [26] Подана заявка на изобретение «Способ оценки трофности водных объектов» от 22 апреля 2016 г. Результаты работы последних лет связаны с дальнейшим углублением понимания процесса формирования СКСЯ, извлечением дополнительных данных о составе водных экосистем. Общеизвестный перечень видимых компонен-

тов может быть расширен за счёт добавления к нему фикоцианина, пигмента, характеризующего синезелёные водоросли, по которому возможно указывать на потенциальную токсичность вод экосистемы. Метод ПОО развит, с его помощью возможно определять фитопланктон различного таксономического состава.

Теоретические и прикладные аспекты изучения экотоксичности поверхностных вод биологическими методами

В условиях современного антропогенного воздействия экосистемы водных объектов изменяются быстрее, чем накапливается информация об этих изменениях. Оценить в конкретный момент времени токсичность конкретного водного объекта позволяет метод биотестирования. Однако водные объекты регионов отличаются гидрохимией и составом гидробиоты в силу географических и климатических особенностей. В связи с этим отличаться будет и химизм загрязняющих веществ, и отклик гидробионтов. В последнее время отмечается усиление синэкологической ориентации токсикологических исследований. Оценить возможные варианты воздействия загрязняющих веществ на биоту, получить отклик гидробиоты и сделать прогноз развития водной экосистемы позволяет метод натурального моделирования загрязнения (мезокосмы). Подробное изложение методов и технических средств физического моделирования внутриводоёмных процессов представлены в работе [17].

Под научным руководством Никанорова силами Гидрохимического (Южного) отдела ИВП РАН в тесном сотрудничестве с ФГБУ «Гидрохимический институт» на протяжении многих лет проводятся комплексные исследования внутриводоёмных процессов в условиях натурального моделирования загрязнения. Работы проводились в мезокосмах, устанавливаемых непосредственно в исследуемом водном объекте. Исследования экотоксичности поверхностных вод в условиях натурального моделирования загрязнения проведено в вегетационные сезоны 20 лет в разнотипных водных объектах Нижнего Дона различной трофности: озёр Чалтырское и Койсуг, рукав реки Дон, временные водоёмы (пруды), заполняемые речной донской водой. В мезокосмах моделировали загрязнение диапазона концентраций тяжёлых металлов, взвешенных веществ, закисления водной среды. В ходе работ проводились теоретические проработки, экспе-

риментальные исследования на основе натурального моделирования загрязнения, съёмки и наблюдения (гидролого-гидрологические, химико-биологические, гидробиологические, токсикологические, спектрометрические) в реальных водных объектах Юга России.

Полученный большой фактический материал позволил сформулировать предложения к использованию методов биотестирования и биоиндикации при исследовании экотоксичности поверхностных вод.

- Необходим набор методов биотестирования, включающих тест-объекты, имеющие средой обитания исследуемую среду, т.е. вода и/или донные отложения.
- Приоритет должен быть отдан набору тест-объектов, охватывающих все возможные уровни среды и звенья трофической цепи (в случае водой среды – бактериальная флора, фитопланктон, микророзопланктон (простейшие, коловратки), мезозoopланктон (рачковый планктон), планктоядные рыбы; в случае донных осадков – представители эпи- и эндофауны и флоры (донная микрофлора, фитобентос, макрофиты, простейшие, моллюски, черви).
- В качестве тест-объектов необходимо использование организмов, биология и экология которых достаточно хорошо изучена, а сами организмы должны легко культивироваться в лабораторных условиях.
- Окончательную оценку качества вод и донных отложений следует проводить по результатам комплекса методов биотестирования, включающими оценку водной среды, экстрактов донных осадков и показатели жизнедеятельности эпи- и эндобентонтов.
- Наиболее приемлемым методическим подходом изучения влияния загрязняющих веществ на гидробиоту является экосистемное моделирование загрязнения (микро- и мезокосмы).
- Решающим показателем для оценки токсичности является размножение. Этот показатель обеспечивает сохранность популяции. Данные по плодовитости при биоанализе природных вод необходимо получать быстро. В этом случае незаменимы гидробионты, имеющие короткий цикл развития. Из числа гидробионтов наиболее подходящими являются представители кл. *Rotatoria* (*Rotifera*, Колувратки) и т. *Ciliophora* (Инфузории).

В ходе мезокосменных исследований выявлены особенности воздействия кадмия на токсичность вод и состояние планктоценозов,

которые обусловлены более высокой щелочностью и температурой поверхностных вод южного региона. Восстановление рН среды в экспериментальных мезокосмах с разовой шоковой и хронической кислотной нагрузкой позволяло сохранять состав гидробиоты без резких изменений, что также связано с геологическими особенностями озёр, проявляющимися в их высокой буферной емкости. Реакция организмов планктона на воздействие граничащих (лимитирующих) значений рН среды укладывалась в рамки закона минимума Ю. Либиха и закона толерантности В. Шелфорда.

Результаты изложены в ряде публикаций и обобщены в монографии «Гидробионты в оценке качества вод суши» [27–31]. Разработана принципиальная схема использования биологических методов с гетерогонными колловратками [27; 32; 33].

Результаты исследований носили новаторский характер – получены патенты. Разработан способ биотестирования токсичности водной среды [34] и устройство для окрашивания организмов зоопланктона с целью дифференциации живых и мёртвых особей в фиксированных пробах [35].

Разработан ряд новых методик для Росгидромета по оценке токсичности вод и донных отложений с использованием нескольких тест-показателей колловраток, хемотаксиса инфузорий, коэффициента регенерации популяции, концентраций хлорофилла а, акцентировано внимание на «адресное» биотестирование токсичности и необходимость использования набора биотестов с тест-объектами разной систематической принадлежности и трофического уровня или набора тест-показателей одного тест-объекта [36–40].

Дана эколого-токсикологическая характеристика поверхностных вод ряда водных объектов юга России (на примере Ростовской области) комплексом биологических методов (биоиндикация и биотестирование): Цимлянского водохранилища, водотоков урбанизированных территорий (реки Темерник, Дон в черте мегаполиса Ростов-на-Дону, ручей федерального значения балки Рябинина), 18-ти малых рек бассейнов рек Тузлов и Северский Донец на углепромышленной территории Восточного Донбасса.

Результаты экспедиционных исследований на судне «Валаам» биоиндикационными и биотестовыми методами свидетельствуют о наличии процессов эвтрофикации и токсификации в Цимлянском

водохранилище, которые сопровождаются резкими колебаниями биомассы и видового состава всех отделов фитопланктона, трофности и токсичности вод. Сочетанное возрастание трофности (по данным биомассы и концентрации хлорофилла *a*), и что крайне важно, – токсичности вод (по данным биотестирования), свидетельствует о сохранении и усилении токсификации экосистемы Цимлянского водохранилища [41–43].

Токсическая нагрузка на экосистемы бассейна Нижнего Дона, в целом, сохраняется. Однако токсичность водных объектов неоднородна: наиболее высока у населённых пунктов и при использовании объектов в целях рекреации, снижается – после мероприятий по очистке водных объектов. В целом отмечено положительное влияние мероприятий по очистке реки Темерник, проведённое администрацией города, на токсическое состояние как реки Темерник, так и участков реки Дон после впадения реки Темерник [44–50].

Метод биотестирования адекватно отражает токсикологическую ситуацию в водных объектах до и после комплекса мероприятий по их очистке, после рекреационной нагрузки. Интегральная оценка токсичности вод, получаемая методом биотестирования, во-первых, показывает реальный уровень токсичности водной составляющей экосистем (от острого токсического действия до его отсутствия); во-вторых, является мобильным откликом водной экосистемы на суммарное воздействие всего комплекса содержащихся в ней загрязняющих веществ; в-третьих, может служить скринингом при выборе проб для последующего дорогостоящего химического анализа; в-четвертых, может служить основой для принятия управленческих решений в условиях чрезвычайных ситуаций.

В условиях стабильно высокого уровня загрязнения метод биотестирования служит реальным инструментом оценки токсичности вод водных экосистем и его можно рекомендовать к постоянному наблюдению за токсичностью водных экосистем.

На протяжении многих лет природный комплекс Восточного Донбасса подвергается интенсивному техногенному воздействию, в связи с чем является одним из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов РФ. Основной вклад в осложнение здесь экологической ситуации вносят предприятия угольной промышленности. Начавшаяся в 1990-е гг. реструктуризация угледобывающей

отрасли, основу которой составляет ликвидация нерентабельных шахт, заметно усилила негативные явления. При этом особенно высокую техногенную нагрузку испытывают поверхностные воды региона. Наиболее уязвимыми оказались малые реки. Впервые в ходе комплексных экспедиций получены новые данные о токсичности проб вод и донных отложений малых рек бассейнов рек Тузлов и Северский Донец, находящихся на территории шахт, затопленных «мокрым способом». Одна и та же проба вод и донных отложений оказывала различное по уровню токсическое действие на разные тест-объекты, что связано с экологическими особенностями используемых тест-объектов. Выявлено, что количество проб токсичных вод и донных отложений выше в реках бассейна реки Северский Донец, чем в бассейне реки Тузлов. Наиболее токсичны воды и донные отложения в устьях рек и ниже мест выхода техногенных шахтных вод. Фильтрованные пробы вод не оказывали токсическое действие. В связи с этим необходимо изучение химического состава взвесей, поскольку именно в них могут содержаться токсичные соединения.

Разработаны схемы использования биологических методов для оценки экотоксичности поверхностных вод с учётом специфики углепромышленных территорий и сельскохозяйственной направленности региона. Изложены в статьях [51–53] и обобщены в монографии [54].

Проведённые исследования и полученные результаты показали перспективность комплексного подхода при изучении внутриводоёмных процессов. Многие результаты являются уникальными и получены впервые. Требуется продолжение работ в этом направлении для развития методологии изучаемого процесса.

Полученные материалы могут быть использованы специалистами, научными и руководящими работниками в сфере мониторинга водных объектов и других системах государственного мониторинга.

Продолжаются теоретические и экспериментальные работы по разработке метода оценки экотоксичности поверхностных вод суши биологическими методами: по показателям природного планктона и монокультур тест-объектов и оценке изменений экотоксичности водных экосистем малых рек бассейна нижнего Дона.

Разрабатываемый метод основан на результатах собственных многолетних натуральных и экспериментальных исследований в области разработки методов анализа и оценки загрязнённости пресноводных экосистем по биологическим показателям, а также анализе имеющегося литературного материала и существующих нормативно-методических документов. Дальнейшая работа над методом требует разработки соответствующих шкал оценки экотоксичности вод по комплексу результатов биоиндикации природного планктона и биотестирования вод на монокультурах тест-объектов и последующей апробации.

Наиболее значимыми обобщающими научными работами этого периода являются монографии Никанорова: «Мониторинг качества вод: оценка токсичности» (2000 г.), «Растворённые и подвижные формы тяжёлых металлов в донных отложениях пресноводных экосистем» (2001 г.), «Локальный мониторинг загрязнения водных объектов в районах высоких техногенных воздействий топливно-энергетического комплекса» (2002 г.), «Научные основы мониторинга качества вод» (2005 г.), «Пресноводные экосистемы в импактных районах России» (2006 г.), «Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем» (2008 г.), «Гарантии и контроль качества гидрохимической информации» (2009 г.), «Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций» (2012 г.), «Методы экспериментальной гидроэкологии» (2012 г.), учебники «Гидрохимия» (1985, 1989, 2001, 2008 гг.), учебные пособия «Региональная гидрохимия» (2011 г.) и «Фундаментальные и прикладные проблемы гидрохимии и гидроэкологии» (2015 г.), Словарь-справочник по гидрохимии и качеству вод суши (понятия и определения) (2015 г.)

Монография Никанорова «Научные основы мониторинга качества вод» – первая и единственная в мире крупная научно-методологическая работа в данной области, которая охватывает теоретические и практические аспекты организации и ведения основных видов мониторинга водных объектов. Эта монография вместе с учебником автора «Гидрохимия» отмечена престижной наградой Российской академии наук – премией Ф.П. Саваренского за выдающиеся работы в области исследования вод суши (2010 г.). Монография переведена на английский язык и опубликована издательством

Nova publishers New York под названием «Monitoring of Water Quality (Scientific and Applied Aspects)» в августе 2013 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хоружая Т.А., Минина Л.И. Оценка экологического состояния Цимлянского, Пролетарского и Веселовского водохранилищ // Метеорология и гидрология. №5, 2017. С. 116–122.

2. Коханистая Е.В., Хоружая Т.А. Современный уровень солевого загрязнения Пролетарского и Веселовского водохранилищ // Известия вузов Северо-Кавказского региона. Ростов-на-Дону, №2, 2015. С. 88–92.

3. Хоружая Т.А., Мартышева Н.А. Связана ли токсичность воды водохранилищ с синезелёными водорослями // Вода: химия и экология. №7, 2014. С. 98–105.

4. Хоружая Т.А., Юрасова Е.Б. Оценка токсичности природных вод Пролетарского и Веселовского водохранилищ / Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод. Материалы науч. конф. 8–10 сент 2015 г. Ростов-на-Дону. С. 145–148.

5. Никаноров А.М., Хоружая Т.А. Внутриводоёмные процессы в крупных водохранилищах юга России: загрязнение, эвтрофирование, токсификация // География и природные ресурсы. №2, 2014. С. 35–43.

6. Хоружая Т.А., Мартышева Н.А., Юрасова Е.Б. Методы оценки токсического влияния фитоценозов планктона на формирование качества поверхностных вод суши. РД 52.24.809-2014. Авт.

7. Хоружая Т.А. Использование биотестирования токсичности в оценке качества воды, загрязнения и эколого-токсикологического состояния поверхностных водных объектов // Биодиагностика и оценка качества природной среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии: Материалы международного симпозиума, МГУ, 25–28 октября 2016 г. М.: ГЕОС, 2016. С. 248–251.

8. Хоружая Т.А. Российские технологии экологической оценки состояния поверхностных водных объектов, основанные на биотестировании токсичности // Сборник научных трудов SWorld. Вып. 3(36). Т. 29. Биология. Материалы заочной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития». Одесса, КУПРИЕНКО СВ, 2014. С. 43–46.

9. Хоружая Т.А. Интегральная оценка состояния экологического благополучия водохранилищ и возможности её использования в мониторинге. Материалы XIII Международного научно-практического симпозиума «Чистая вода России», 17–19 марта 2015 г.

10. Хоружая Т.А., Минина Л.И., Мартышева Н.А. Оценка состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. Р 52.24.763-2012.

11. Хоружая Т.А., Минина Л.И. Проявление признаков экологического бедствия на крупных водохранилищах юга России // Сборник научных трудов Всероссийской науч. конф. «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»

6–11 июля 2015 г. Т. 1. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 379–385.

12. Sukhorukov B.L., Garbuzov G.P., Akawiec A.A. Model calculations of brightness coefficients spectra for the interpretation of the spectrometric data on fresh water quality // Seventh Int. Symp. «Atm. and Ocean Optics». Proc. SPIE., Vol. 4341, 2000. P. 503–510.

13. Сухоруков Б.Л., Гарбузов Г.П., Никаноров А.М. Оценка состояния водных объектов по спектрам коэффициента яркости // Водные ресурсы. №5, 2000. С. 579–588.

14. Сухоруков Б.Л., Новиков И.В. Сравнительный анализ двух способов интерпретации дистанционных спектрометрических данных о состоянии водных экосистем // Оптика атмосферы и океана. Т. 14, №10, 2001. С. 944–949.

15. Sukhorukov B.L., Novikov I.V. The information content of spectra of the brightness coefficients for water ecosystems // Eights Int. Symp. «Atm. and Ocean Optics». Proc. SPIE., Vol. 4678, 2001. P. 344–351.

16. Сухоруков Б.Л., Новиков И.В., Никаноров А.М. Использование пространства оптических образов для интерпретации данных дистанционных спектрометрических измерений в пресноводных экосистемах // Вестник ЮНЦ РАН. №3, 2006. С. 25–32.

17. Трофимчук М.М., Бакаева Е.Н., Сухоруков Б.Л. Фазовые портреты водных объектов при натурном моделировании экосистемных процессов // Вестник Южного научного центра РАН. №2, 2010, С. 28–37

18. Никаноров А.М., Трофимчук М.М., Сухоруков Б.Л. Методы экспериментальной гидроэкологии: монография, Ростов-на-Дону, «НОК», 2012. 350 с.

19. Сухоруков Б.Л., Новиков И.В. Информативность спектров яркости в видимом спектре в натурном эксперименте с экосистемами эвтрофных водоёмов // Материалы III Всероссийской конференции по водной токсикологии (Борок, 11–16 ноября 2008 г.). Ч.3. ООО «Ярославский печатный двор», Брок, 2008. С. 126–130.

20. Сухоруков Б.Л. Никаноров А.М. Цикличность внутриводоёмных процессов по данным дистанционной спектрометрии в эвтрофных водоёмах // Доклады РАН. Т. 400, №3, 2005, 378–381. (Пер.: Sukhorukov B.L., Nikanorov A.M. Cyclic patterns of intrabasin processes inferred from remote sensing spectrometry in eutrophic basins / Doc. Earth Sci. V.400, №1. 2005. P. 132–135).

21. Sukhorukov B.L., Nikanorov A.M. Cyclic Recurrence of Intrareservoir Processes with Anthropogenic Impact on Freshwater Ecosystems // Aquatic Ecosystems, 2011. Nova Science Publishers, Inc, Ed. Sheila A. Brown. Chept. 5, 27. Pp. 169–194. ISBN: 978-1-613244-399-2.

22. Сухоруков Б.Л., Новиков И.В. Гомеостаз водных экосистем по данным дистанционной спектрометрии // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы школы-семинара: «Современные методы исследования и оценки качества вод, состояния водных организмов и экосистем в условиях антропогенной нагрузки». Материалы IV научной конференции (24–29 сентября 2011). Ч. 1. Борок, 2011. С. 59–63.

23. Никаноров А.М., Сухоруков Б.Л. Об экологическом гистерезисе // Доклады академии наук. Т. 422, №6, 2008. С. 811–814. (Пер.: Nikanorov A. M., Sukhorukov B.L. Ecological Hysteresis // Doclady Earth Science. Vol. 423, №8, 2008. Pp. 1282–1285).

24. РД 52.24.729.2010 Дистанционная спектрометрическая съёмка водных объектов в видимом диапазоне волн с мостовых переходов. Ростов-на-Дону, 2010. 22 с.

25. Р 52.24.844–2016. Оценка трофического статуса водных объектов по дистанционной спектрометрической информации видимого диапазона электромагнитного спектра. Ростов-на-Дону, 2016. 14 с.

26. Сухоруков Б.Л., Ковалёва Г.Е. Новиков И.В. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектрометрии высокого разрешения видимого диапазона // Водные ресурсы. Т. 44, №1, 2017. С. 79–90.

27. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А. Место биотестовых исследований донных отложений в мониторинге водных объектов Вестник Южного научного центра. Т. 5, №2, 2009. С. 84–94.

28. Трофимчук М.М., Бакаева Е.Н., Сухоруков Б.Л. Фазовые портреты водных объектов при натурном моделировании экосистемных процессов Вестник Южного научного центра. Т. 6, №2, 2010. С. 28–38.

29. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Натурное моделирование загрязнения водных экосистем. Оценка экотоксичности: Материалы конф. междунар участием «Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС)». Дюрсо, 8–14 сентября 2013.

30. Бакаева Е.Н., Черникова Г.Г., Тарадайко М.Н. Изменение структурных и пигментных характеристик фитопланктона под влиянием кадмия // Сборник статей «Экология. Экономика. Информатика». Т. 1 «Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС)». Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. 2015. С. 41–47.

31. Бакаева Е.Н., Тарадайко М.Н. Экотоксичность вод модельных экосистем в условиях загрязнения кадмием // Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика) Материалы V Международной конференции молодых ученых (5–8 сентября 2016 г.). Т. 2, Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. С. 105–113.

32. Тарадайко М.Н., Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Токсичность вод по показателям природного зоопланктона и монокультуры беспозвоночных в условиях влияния кадмия / Актуальные проблемы наук о Земле: сборник трудов II научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием // Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. С. 474–477.

33. Бакаева Е.Н. Методико-методологические аспекты биотестирования вод с использованием гидробионтов, обладающих гетерогонией Материалы III Всероссийской конференции по водной токсикологии «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». Ч. 3. ООО «Ярославский двор», Борок, 11–16 ноября 2008. С. 3–5.

34. Патент на изобретение №2462707 Способ биотестирования токсичности водной среды [Текст] / Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А. 27.09.2012. Бюл. №27.

35. Патент Российская Федерация, Полезная модель, МПК G01N 33/18. Устройство для окрашивания организмов зоопланктона с целью дифференциации живых и мёртвых особей в фиксированных пробах [Текст] / Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А., Циркунов В. А.; заявл. 15.08.2013; опубл. 20.09.2014, Бюл. №26. – 2 с.: 1 ил.

36. Никаноров А.М. (руководитель разработки), Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Ходурская Л.М. Оценка токсического загрязнения природных вод и донных отложений пресноводных экосистем методами биотестирования с использованием коловраток РД 52.24.662-2004. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. 60 с.

37. Никаноров А.М. (руководитель разработки), Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Унифицированные методы биотестирования для обнаружения токсического загрязнения поверхностных вод суши с использованием микрозоопланктона РД 52.24.669-2005. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. С. 6-28.

38. Никаноров А.М. (руководитель разработки), Бакаева Е.Н., Черникова Г.Г., Игнатова Н.А. Оценка токсического загрязнения природных вод и донных отложений водных экосистем по коэффициенту регенерации популяции Р 52.24.695-2007. Ростов-на-Дону: Росгидромет ФГБУ «ГХИ», 2008. 21 с.

39. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Оценка токсичности поверхностных вод суши в условиях чрезвычайных ситуаций методом экспрессного биотестирования РД 52.24.741-2010. Ростов-на-Дону: Росгидромет ФГБУ «ГХИ», 2011. С. 67–90.

40. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г. Оценка токсичности поверхностных вод суши методом биотестирования с использованием хлорофилла а. Р 52.24.808–2014 Ростов-на-Дону: Росгидромет ФГБУ «ГХИ», 2014. 23 с.

41. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Экоотоксичность вод Цимлянского водохранилища в период цветения сине-зелёных микроводорослей // Глобальная ядерная безопасность. №4, 2012. С. 114–20.

42. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г. Эколого-токсикологическая ситуация Цимлянского водохранилища в современный период // Всероссийская научная конференция «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике» (г. Цимлянск, 23–28 июля 2012 г.) Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012, С. 151–157.

43. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Качество вод приплотинной части Цимлянского водохранилища в условиях цветения сине-зелёных микроводорослей // Глобальная ядерная безопасность. №1, 2013. С. 23–29.

44. Бакаева Е.Н., Остапова Н.И. Экоотоксичность вод эвтрофных водохранилищ // Сборник материалов Всероссийской научной конференции «Механизмы устойчивости и адаптации биологических систем к

природным и техногенным факторам» (22–25 апреля 2015 г.). Киров: Изд-во ООО «ВЕСИ». 2015. С. 338–342.

45. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Эколого-токсикологическое состояние нижнего течения р. Дон Материалы III Всероссийской конференции по водной токсикологии «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». Ч. 3. ООО «Ярославский двор», Борок. 11–16 ноября 2008. С. 193–197.

46. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Динамика токсичности вод и донных отложений водного объекта рекреации Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». №6, 2011.

47. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г., Рудь Д.А. Токсичность вод и донных отложений урбанизированного участка реки Темерник (г. Ростов-на-Дону, ЮФО) // Современные проблемы науки и образования. №2, 2013.

48. Бакаева Е.Н. токсичность вод и донных отложений урбанизированного участка реки Темерник (г. Ростов-на-Дону, ЮФО) // Современные проблемы науки и образования. №2. Издательство: Издательский Дом Академия Естествознания (Пенза), 2013. С. 408. ISSN: 1817-6321.

49. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Динамика токсичности вод малой реки в пределах мегаполиса (р. Темерник, ЮФО) // «Живые и биокосные системы». №7, 2014.

50. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А. Анализ токсичности поверхностных вод бассейна Нижнего Дона в черте г. Ростов-на-Дону по многолетним данным биотестирования // Водные ресурсы. Т. 41, №1, 2015. С. 70–77.

51. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М. Биологические подходы к оценке экотоксикологического состояния водных экосистем // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. №1, 2015. С. 72–83.

52. Бакаева Е.Н. Тарадайко М.Н. Экоотоксичность поверхностных вод бассейна реки Северский Донец (Ростовская область) по результатам набора биотестов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. №4, 2016. С. 57–61.

53. Bakaeva E., Sklyarenko G., Taradayko M., Kondakova M. «Method of assessment of water ecosystems based on ecotoxicological approach in relation to the specifics of coal mining areas of Rostov region (Russia)» SGEM VIENNA GREEN 2016, Book 3, Vol.3, DOI 10.5593/SGEM2016/HB33/S02.024.

54. Закруткин В.Е., Склярченко Г.Ю., Бакаева Е.Н. и др. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. 172 с.

Развитие медико-экологических исследований водных проблем в ИВП РАН

Л.И. Эльпинер

Разработка научных основ медико-экологического подхода. Исторически, потребность медико-экологической оценки и прогнозирования влияния гидрологической обстановки на здоровье населения возникла в ИВП АН СССР (ныне ИВП РАН) в связи с необходимостью расширения диапазона исследований водных проблем, обозначившейся в 1970-е гг., при изучении крупномасштабного гидротехнического проекта. Именно здесь впервые возникла острая необходимость комплексной оценки последствий радикального изменения режима, количества и качества вод.

В основу исследований был положен сформированный комплексный междисциплинарный природоведческий и медико-биологический подход, далее получивший признание на отечественных и на международных научных форумах как подход медико-экологический [2]. Для этого подхода к обоснованию профилактических мероприятий было важно широкое понимание условий формирования здоровья человеческой популяции и его патологических отклонений в связи с внутри- и внеорганизменными предпосылками. Последние своими корнями связаны с особенностями динамики среды обитания и более масштабными биосферными процессами, обуславливающими онто- и филогенетические эволюционные процессы, свойственные виду *Homo Sapiens* и зависящие, как очевидно, от сложнейших генетических, биоэнергетических и биоритмических механизмов, развивающихся на экологическом и социально-экономическом фоне и ими корректируемых. Основы представлений такого рода, заложенные ещё В.И. Вернадским и А.Л. Чижевским, послужили для разработки новых концепций, которые позволили бы замкнуть в единое целое системы знаний об организме, популяции, биосферных и внебиосферных процессах. Ёмкость такого подхода определяет роль, место и задачи современной профилактической медицины, выводя её на платформу междисциплинарных научных подходов [24, 29]. Недооценка этого принципиального положения при обосновании профилактических мероприятий здравоохранения, в основном, лишь

на уровне снижения интенсивности болезнетворно-активных факторов окружающей среды в зоне их прямого взаимодействия с организмом человека во многом определяла ограниченную эффективность профилактических мер здравоохранения и, как следствие, нарастающий характер заболеваемости, обусловленный усиливающимися антропогенными трансформациями природной среды, заболеваемости как инфекционными, трансмиссивными, так и неинфекционными заболеваниями. Сущность сформировавшегося медико-экологического направления в подходах к определению и оценке последствий изменений гидрологической обстановки состояла прежде всего в построении медико-экологических прогнозов на основе выявления причинно-следственных связей возможных изменений санитарных условий жизни, состояния здоровья населения и изменений природной среды как в самом водоёме, так и на территории зоны его влияния [19, 22, 24].

Для решения этой сложной, многофакторной задачи оказалось возможным использование множественной информации, накопленной интенсивно развитыми исследованиями в области гигиены, эпидемиологии, паразитологии, санитарной гидробиологии, экологии суши, гидрологии и гидрохимии, гидрогеологии и некоторых других дисциплин. Методологически они были замкнуты в единой системе при оценочных и прогностических построениях, базирующихся на медико-экологических интерпретациях положений смежных дисциплин. В процессе развития методологии данного направления исследований были адаптированы современные методы оценки риска для здоровья населения при воздействии веществ, загрязняющих окружающую среду [18], что значительно уточняло доказательства причинно-следственных связей различных видов заболеваний с воздействием водного фактора. Важно отметить развитую математическую основу этой методики, всё шире используемой в развитых странах.

Следует подчеркнуть, что предложенный в ИВП подход отличала природоведческая основа, дающая возможность прогнозирования последствий изменений гидрологической обстановки для условий жизни и состояния здоровья населения с учётом экологических факторов, влияющих на динамику развития человеческой популяции. Одновременно этот подход открывал возможности примене-

ния оцениваемых критериев при анализе изменений состояния экосистем воды и суши [27,44].

Разработке научных основ этого направления исследований предшествовала оценка роли водного фактора в формировании состояния здоровья населения и санитарных условий его жизни [24]. Посвящённый этому вопросу широкий круг публикаций свидетельствовал о наличии тесных связей ряда кишечных инфекций с использованием микробиально загрязнённых вод, связей неинфекционных заболеваний (сердечно-сосудистой, выделительной, нервной и других систем организма человека), вызываемых наличием антропогенного загрязнения и особенностями природного состава используемых вод.

Наиболее сложные задачи были сосредоточены в проблеме медико-экологической оценки характера изменений режима, количества и качества вод и трансформаций экосистем воды и суши в связи с меняющейся гидрологической обстановкой. Влияние последней на функциональное состояние экосистем было очевидно для биологов. От неё зависят такие важнейшие процессы, как самоочищение воды, биоаккумуляция, биотрансформация и биodeградация загрязняющих веществ, определяющие и возможности прямого хозяйственно-питьевого и рекреационного использования водных объектов. Неблагоприятное развитие этих процессов определяет интенсивность влияния микробной и токсической составляющих водного фактора. Прямым следствием ухудшения качества воды здесь является возможность развития инфекционных заболеваний и интоксикации, нарушений механизмов наследственности, влияющих на популяционные характеристики здоровья [27].

К медико-экологическому направлению исследований ИВП следует отнести и совершенно новый практически важный раздел актуальной проблемы охраны водных ресурсов и водной токсикологии – лекарственное загрязнение природных и сточных вод. Проведение этих исследований, выполненных под руководством доктора физико-математических наук, профессора, известного крупного специалиста в области медицинской биофизики Г.М. Баренбойма, впервые установило наличие в РФ лекарственного загрязнения вод и вытекающих из этого экологических рисков для человека и гидробиоты. Показана необходимость принятия специальных мер нор-

мотворческого характера по уменьшению лекарственного загрязнения, а также улучшение существующего законодательства и подзаконных актов, связанных с регламентом обращения с отходами, обращением с лекарствами и т.д., что может заметно снизить экологические риски ксенобиотического загрязнения, обладающего лекарственной активностью [5].

Излагаемые далее в настоящей статье материалы отражают содержание основных медико-экологических исследований ИВП, проведенных в рамках работ по изучению крупных фундаментальных водных проблем с использованием разработанного научного подхода.

Крупномасштабное территориальное перераспределение водных ресурсов. Речь идёт о проекте переброски части стока северных (Печора) и сибирских рек (Обь, Иртыш) в бассейны Волги и Дона (на ЕТС), а в азиатской части страны – в Аральский регион (бассейны рек Амударья и Сырдарья). К концу 1970-х гг. гидротехнические разделы этого одиозного проекта были, в основном, уже созданы, однако экономические, социальные и медицинские проработки практически отсутствовали.

Разработанная в ИВП и реализованная под руководством института программа медико-экологических исследований этой проблемы обеспечила согласованное развитие комплексных работ, в которых участвовали 22 научно-исследовательских и образовательных (центральных и региональных) институтов системы здравоохранения и Академии медицинских наук, а также крупные местные организации санэпидслужбы. Решение этой проблемы потребовало от исполнителей специальных методологических и методических разработок [8]. Оказалось возможным оценить медико-биологическую обстановку, зависящую от водного фактора на ряде локальных территорий страны, и, опираясь на гидрологические, гидрогеологические, гидрохимические, гидробиологические и зооботанические прогнозы, оценить возможные её изменения, учитывая при этом и планы народнохозяйственного развития. Был сформулирован и ряд конкретных рекомендаций, касающихся предотвращения или смягчения выявленных негативных последствий предлагавшихся водохозяйственных решений, вплоть до отклонения тех или иных гидротехнических вариантов.

Нельзя не отметить, что «... проект разворота рек вспять был типичным проявлением советской гигантомании. Это было продолжение сталинской политики покорения природы, когда, во-первых, совершенно отсутствовало какое-либо серьёзное понимание экологических проблем, а во-вторых, был исключён из рассмотрения вопрос об экономической целесообразности» (из интервью член-корреспондента РАН, директора ИВП В.И. Данилова-Данильяна). Предварительная стоимость только сибирской части проекта (водоподача, распределение, сельхозстроительство и освоение, объекты АПК), равнялась 32,8 млрд рублей [17]. Однако, было бы несправедливым не отметить беспрецедентное, не имеющее мировых аналогов по своему масштабу, комплексирование (на базе единой государственной программы) разноступенчатых, но смежных по направленности научных исследований, часто выходящих далеко за рамки узких проектных проработок. Так, периоду формирования и развития медико-экологических исследований, проведённых применительно к проекту перераспределения стока северных и сибирских рек, уже предшествовал целый ряд гидрологических, гидрогеологических, гидротехнических, гидробиологических, гидрохимических проработок, материалы которых были столь необходимы для реализации прогнозного медико-экологического подхода.

Первоначально они были выполнены применительно к обоснованию экспертных оценок [2], получив далее более глубокое развитие. Применительно к проблеме перераспределения водных ресурсов, результаты проведенных работ выявили вероятность появления ряда крайне нежелательных последствий, связанных с территориальным перераспределением с водными потоками ряда токсичных веществ, патогенных микроорганизмов, возможность усугубления эпидемической ситуации по кишечным инфекциям, ухудшения паразитологической обстановки за счёт расширения ареалов обитания возбудителей и переносчиков трансмиссивных заболеваний. Весьма негативны оказались возможные изменения санитарных условий водопользования и общей санитарно-эпидемиологической обстановки в условиях использования антирек, в устьевых зонах крупных водотоков за счёт расширения зоны проникновения галлоклина. Нерешённой оказалась проблема изменения природного состава воды водоисточников за счёт смешения вод разных гидрохи-

мических классов, что выдвигало необходимость проведения специальных и весьма сложных исследований физиологической полноценности питьевых вод [23].

Обобщение результатов проведённых работ поставило под сомнение возможность реализации самой идеи перераспределения стока, выдвинув на первый план необходимость опережающих полнообъёмных водоохраных и медико-профилактических мероприятий, соизмеримых по стоимости с огромными затратами на гидротехнические работы. Также был высказан ряд соображений, касающихся вероятных негативных изменений условий жизни населения в связи с трансформациями природной среды обитания человека – изменениями миграционных потоков, трудовой занятости, пищевой обеспеченности, наконец, климатических условий [24]. Сочетание этих выводов с резко отрицательным мнением крупных экологов, социологов, экономистов и явилось причиной закрытия проекта переброски на государственном уровне.

Однако, для развития учения об управлении водными ресурсами, во всяком случае, для его медико-экологических аспектов, постановка и проведение развернутых комплексных междисциплинарных исследований сыграла, несомненно, прогрессивную роль. Прежде всего, это касалось разработки научных основ, методологии и методов прогнозирования медико-экологических последствий гидротехнического строительства.

Гидротехническое строительство. Проведённые исследования позволили впервые в отечественной научной литературе рассмотреть вопросы создания, реконструкции и эксплуатации крупных водных объектов (каналов, водохранилищ) под новым углом зрения, отличным от ранее принятого ограниченного санитарно-гигиенического подхода. Речь шла о необходимости рассмотрения положительных и отрицательных сторон создания зарегулированных водотоков не только с точки зрения изменений санитарных условий водопользования населения, но и с позиций влияния на состояние его здоровья по эпидемиологическим и паразитологическим показателям, зависящих от антропогенных изменений гидрологической обстановки в целом [19].

Общеизвестны положительные социально-экономические последствия гидростроительства, способствующие улучшению

условий труда, быта и отдыха людей и снижению в этой связи общей заболеваемости. Вместе с тем в целом ряде случаев существенны и негативные последствия создания водохранилищ – ухудшение эпидемиологической и паразитологической обстановки, качества воды питьевых водозаборов, ухудшение некоторых климатических параметров, повышение уровня стояния грунтовых вод, замена привычного вида трудовой деятельности значительных контингентов населения, изменение характера его питания. [6,7]. Все эти факторы также влияют на состояние здоровья и общую заболеваемость населения. В связи с этим огромное значение приобретало объективное изучение и прогнозирование многообразных последствий воздействия водохранилищ на природу, хозяйство, население и его здоровье [14]. Это было необходимо для всесторонней оценки хозяйственной целесообразности создания того или иного водохранилища для определения очерёдности гидротехнического строительства (как в целом по стране, так и в отдельных речных бассейнах), для оптимального выбора основных параметров гидротехнических сооружений и в первую очередь отметки нормального подпорного уровня (НПУ) водохранилища и места расположения; для установления оптимального для хозяйственных нужд режима эксплуатации гидроузла и водохранилища; для максимального использования положительных и ограничения или исключения отрицательных последствий создания водохранилища (в том числе определения необходимого состава и объёма мероприятия, направленных на обеспечение благоприятных условий жизни и здоровья населения.

При разработке основополагающей концепции этой части исследований было показано, что интересы жизнеобеспечения и охраны здоровья населения в связи с антропогенными изменениями гидрологической обстановки требуют принципиально нового подхода для обеспечения медико-экологических прогнозов. Для решения этой сложной многофакторной задачи оказалось возможным использование многоаспектной информации в области гигиены, эпидемиологии, паразитологии, санитарной гидробиологии, экологии суши, гидрологии и гидрохимии, гидрогеологии и некоторых других дисциплин. Исследования, проведённые в комплексе с институтами медико-профилактического профиля (НИИ гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, ИМПИТМ им. Е.И. Марциновского, ЦНИИ эпи-

демиологии МЗ СССР, НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалея АМН СССР, НИИ общей и коммунальной гигиены АМН СССР) позволили разработать научные основы и принципиальные методы медико-экологического прогнозирования последствий гидротехнического строительства. Итоги этой работы оформлены в виде специального руководства, изданного Научным Советом РАН по проблемам биосферы [19], отражены в отдельных главах двух крупных коллективных монографий, посвящённых водохранилищам. [6,7].

Разработанная методология прогнозов позволяет обосновывать и закладывать в проектные проработки гидротехнического строительства и планы связанного с ним народнохозяйственного развития мероприятия по усилению положительных и предотвращению или ослаблению возможных негативных влияний гидрообъектов на медико-экологическую обстановку. Они включают в себя набор наиболее правильных гидротехнических решений, обеспечивающих в новых и преобразуемых водных объектах такой водный режим и качество вод, которые исключают или снижают возможности появления отрицательных для здоровья населения эффектов. Здесь же были сформулированы и основы мероприятий, предупреждающих возможные негативные последствия [3].

Разработанный подход в дальнейшем был успешно использован при оценке возможных медико-экологических последствий реализации проекта Красногорского гидроузла с созданием руслового водохранилища в районе г. Омска в связи с сокращением стока Иртыша. Исследования проведены совместно с автором проекта – институтом «Мособлгидропроект» [32]. Полученные материалы свидетельствовали о необходимости проведения ряда мероприятий в случае положительного решения о его создании: (проведение водоохраных мероприятий до введения водохранилища в эксплуатацию на основе специального комплексного плана заинтересованных организаций (интенсификация контрольных и профилактических мероприятий органов Роспотребнадзора в связи с опасностью распространения отдельных инфекционных и паразитарных заболеваний). Было сформулировано предложение о создании в Омской области специальной службы межведомственного комплексного мониторинга для слежения за экологической, гидро-

логической, санитарно-эпидемиологической обстановкой в зоне влияния водохранилища в целях своевременной информации эксплуатирующих и контролирующих организаций, и принятия предупредительных мер. В связи с возможным возникновением чрезвычайных ситуаций, связанных с несанкционированными или залповыми сбросами сточных вод на сопредельных территориях, было рекомендовано создание специального подразделения, владеющего соответствующими приемами и оборудованием для предупреждения распространения загрязнений в акватории водохранилища. Важным явилось предложение о необходимости разработки Генеральной схемы охраны и рационального использования водных ресурсов р. Иртыш. Результаты проведенных исследований имеют прямое негативное отношение к возрождающимся идеям трансграничной переброски части стока сибирских рек на сопредельные зарубежные территории.

Медико-экологическое районирование территории. Проведенные исследования позволили перейти к следующему этапу разработок медико-экологического прогнозирования: оценке последствий изменений гидрологической обстановки, т.е. при более широком диапазоне явлений, далеко выходящих за рамки влияния гидротехнического строительства. Целью медико-экологического районирования является оценка факторов риска заболеваемости населения, прямо или косвенно связанной с использованием вод для хозяйственно-питьевых целей. Решаемые при этом задачи связаны с необходимостью уяснения характера и степени влияния качества и количества вод на состояние здоровья населения.

Для развития методологии такого прогнозирования, а конкретнее, для получения необходимого банка исходных данных, существенное значение приобрели разработки методов районирования территории по медико-демографическим, эпидемиологическим, санитарно-гигиеническим показателям и санитарным условиям водопользования населения.

Проведение этой работы в рамках ФЦП «Возрождение Волги» (совместные исследования ИВП РАН, Института паразитологии РАН и НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды РАМН) обусловило первоочередную ориентацию исследований на проблемы крупного речного бассейна [16].

Характер патогенетической направленности действия биологических и химических компонентов вод определил необходимость районирования территории по медико-демографическим показателям, показателям инфекционной и неинфекционной заболеваемости, имеющей прямые или вероятностные связи с микро- и/или макроэлементным (природным и антропогенным) химическим, микробным и паразитарным составом вод.

В основу медико-экологического районирования были положены принципы таксонизации территории: по характеру биологического действия загрязняющих и/или природных компонентов с учётом анализа риска для здоровья, воздействия на демографические показатели и показатели инфекционной, паразитарной и неинфекционной заболеваемости населения, изменения медико-демографических показателей, по степени изменения показателей заболеваемости населения, связанной с природным составом, химическим и биологическим загрязнением вод.

В связи с очевидными современными экономическими сложностями получения достаточно обоснованных эколого-эпидемиологических данных на крупных территориях России, было предложено использование методов оценки факторов риска для здоровья населения путём установления степени опасности и приемлемости для питьевого водопользования различных водоисточников на основе совместного использования двух официально принятых гигиенических классификаций: распределения вредных веществ по классам опасности и распределения водных объектов по характеру загрязнения. Такой подход не противоречил принятой на национальном и международном уровне методологии оценки качества вод. В тоже время, он позволял получать наиболее адекватные представления о степени экологической опасности водоисточника. Применительно к внедряемой в России системе регионального нормирования качества питьевой воды, такое предложение приобрело практическую значимость.

В составе этих исследований большой раздел работ был выполнен совместно с Институтом паразитологии РАН, имевшим большой опыт разработки методов районирования территории РФ в отношении природно-очаговых и паразитарных болезней и прогнозирования изменений обстановки по этим группам заболеваний на

фоне изменяющихся условий окружающей среды. Исследования проводились с учётом дальнейшего использования их основных положений при разработке методологии прогнозирования изменений паразитарной обстановки территорий речных бассейнов [4].

Разработка необходимых базовых медико-экологических критериев, характеризующих ситуацию по этим группам заболеваний, позволила определить специфику подходов к медико-экологическому районированию в отношении паразитозов. Также был проведён анализ методов оценки информации, используемой при районировании, и выделены основные принципы районирования по показаниям статистики и «по предпосылкам». Наиболее важным здесь было определение методов, дающих наиболее ёмкую, обладающую прогностической ценностью информацию (кластерные анализы, метод квантирования, информационно-аналитические методы, сочетанные картографические методы). Разработанная методология была апробирована при оценке паразитологической ситуации в двух Волжских регионах: Республике Калмыкии и Астраханской области. Это позволило дать рекомендации для достижения максимально эффективных результатов районирования по паразитарным и природно-очаговым болезням на территории всего Волжского бассейна [4].

Колебания уровня внутренних морей. Исследования медико-экологических аспектов этой проблемы первоначально были проведены в ИВП в связи с развившейся Аральской экологической катастрофой, а далее в связи с трансгрессией Каспийского моря. [9, 13, 30]. Участие в этих исследованиях 9 крупных центральных и региональных исследовательских институтов системы здравоохранения и Академии медицинских наук, обеспечило не только широкий внутри-медицинский междисциплинарный подход, но и достаточно детальные разработки на каждом из этих дисциплинарных направлений [13].

Анализ динамики развития наблюдаемых видов патологий человека в Восточном Приаралье позволил установить прямые причинно-следственные связи высоких уровней инфекционной кишечной, паразитарной и неинфекционной заболеваемости (болезни почек, печени, крови, онкологические заболевания, генетические нарушения) со значительными микробными и химическими загрязнения-

ми питьевой воды, выявил трёхфазность процесса динамики формирования заболеваемости: гиперэпидемическую, иммунодефицитную и отдаленную неинфекционную фазы [25].

Полученные данные рассматривались как прогностическая модель развития резко негативной медико-экологической ситуации в условиях сочетания процессов деградации качества вод суши и кризисных социально-экономических явлений. Впервые была рассмотрена динамика развития медико-экологической обстановки на орошаемой территории аридной зоны, переживающей сложнейшую экологическую ситуацию. Резкое ухудшение качества среды обитания, условий жизни, питания, труда и отдыха местного населения в совокупности с крайне низкой базой профилактической и клинической медицины привело к росту заболеваемости и смертности людей до наивысшего уровня, зарегистрированного в стране в период 1980-х гг.

Материалы исследований позволили утверждать, что формирование негативно действующих факторов среды обитания человека в Приаралье непосредственно связано с процессами, определившими и возникновение Аральского экологического кризиса, дестабилизацию природной среды Аральского региона. Был разработан медико-экологический раздел концепции преодоления последствий Аральского экологического кризиса. Этот раздел также содержал обоснованную программу кратко-, средне- и долгосрочных мероприятий, ориентированных на медико-экологические приоритеты [13].

Итоги этих работ привлекли внимание международных и национальных зарубежных организаций. Впервые они были доложены в 1990 г. на международном симпозиуме «Аральский кризис – проблемы охраны окружающей среды в Центральной Азии» в Блумингтонском университете (США); на специальных слушаниях в ООН (Швейцария, Женева); на II конференции стран СНГ и США по гидрологическим и гидрогеологическим проблемам окружающей среды (США, Вашингтон). Они вошли в состав международного проекта ЮНЕП и были рассмотрены в ВОЗ с целью формирования специального проекта ЮНЕП/ВОЗ/СНГ. Результаты этих исследований были обобщены и в отдельной коллективной монографии институтов-соисполнителей [13] и рассмотрены в других научных публикациях.

Исследований медико-экологических аспектов проблемы трансгрессии Каспийского моря проведены творческим коллективом, созданным Научным советом РАН по проблеме Каспия в целях разработки концепции преодоления последствий повышения уровня моря. Он включал специалистов ИВП (головная организация), Института паразитологии РАН (ИП РАН), Центра демографии и экологии человека Института народно-хозяйственного прогнозирования РАН.

Материалы исследований медико-демографической ситуации, заболеваемости, санитарных условий жизни населения выявили выраженное неблагополучие санитарно-эпидемиологической обстановки в связи с изменениями гидрологических условий, деградацией качества водоисточников и резким осложнением социальной обстановки в зоне подтопления и затопления населенных мест сельскохозяйственных угодий и объектов народного хозяйства [9]. Были установлены высокие уровни кишечной и паразитарной заболеваемости населения, непосредственно связанной с водным фактором и доминирующими в общем спектре нозологических форм, особенно в прибрежных поселениях. Экспертный анализ причин неинфекционных заболеваний сердечно-сосудистой, нервной и выделительной систем, генетических нарушений и раковых заболеваний выделил доминирующее значение прямого и косвенного влияния водного фактора. По коэффициенту суммарной оценки состояния здоровья населения изученные территории России (Дагестан, Калмыкия, Архангельская область) были отнесены к числу весьма неблагополучных. В рамках проведённых исследований был разработан прогноз дальнейшего негативного развития медико-экологической ситуации в зоне влияния трансгрессии моря и рассмотрены возможные медико-экологические последствия использования различных вариантов гидротехнических защитных сооружений [30, 43].

На основе проведённых исследований был разработан медико-экологический раздел концепции преодоления кризисных явлений, связанных с повышением уровня моря, подготовленный Научным советом РАН по проблеме Каспия [30]. Итоги этих исследований были обсуждены на крупной Международной конференции по проблемам вредного воздействия вод (Лос-Анжелес, 1997).

Для развития фундаментальных научных исследований водных проблем, проведённые работы важны расширением представлений о формировании здоровья населения в условиях критически изменяющейся гидрологической обстановки. Были показаны явления, процессы и закономерности развития патологии человека в условиях катастрофически повышенной и пониженной обводнённости территории. Определены последовательность, временная этапность и фазовость развития инфекционной, паразитарной и неинфекционной патологии. Установлены причинно-следственные связи наблюдавшейся патологии с воздействием комплекса изменяющихся природных, антропогенных и социально-экологических факторов. Исследования, проведённые на крупномасштабных природных моделях влияния процессов изменения водности территории на медико-экологическую обстановку, показали, что речь здесь идёт о создании более благоприятных условий для реализации эпидемических процессов кишечных инфекций и паразитарных заболеваний, интенсификации воздействия токсического антропогенного загрязнения вод, развитии белково-витаминной недостаточности и снижении иммунной защиты организма, влиянии нарастающих стрессовых состояний, наконец, о воздействии всего комплекса негативных социальных явлений, связанных с активизацией процессов миграции населения – ухудшения условий проживания, изменения трудовой занятости, характера питания и т.п. [9, 13, 30].

Проведённые исследования позволили выявить причинно-следственные связи, особенности и закономерности формирования высоких уровней различных форм инфекционной и неинфекционной заболеваемости населения в условиях резко выраженного прямого и косвенного воздействия водного фактора в экстремальных условиях.

Идентичность последствий, ведущих к всё более резкой потере потенциалов жизнеобеспечения, как в случае повышения, так и в случае понижения водности территории, оказывается и причиной схожих негативных медико-экологических процессов, в целом характеризующихся снижением продолжительности жизни, ростом детской и взрослой смертности, нарастанием инфекционной (особенно кишечной), паразитарной и неинфекционной патологии, генетических нарушений.

Интерпретируя эти процессы применительно к условиям изменений гидрологической обстановки в зонах выраженного влияния процессов глобального потепления на планете приходится констатировать, что при упрочении представлений о необратимости и нарастании наблюдаемых уже сегодня явлений, возникает необходимость планирования крупномасштабных мероприятий для смягчения последствий развития новой климатической ситуации как на национальном, так и на международном уровне. Изложенные выше соображения подтверждают необходимость интенсивного развития медико-экологических исследований современных глобальных гидроклиматических изменений.

Глобальные гидроклиматические изменения. Крупномасштабные глобальные изменения природной среды в настоящее время становятся все более очевидными. Главным фактором этих изменений является прогрессирующее потепление климата, которое продолжается уже более 100 лет. Важнейшей задачей современных научных исследований является установление многолетней динамики глобальных гидроклиматических процессов, изменяющихся под воздействием природных и антропогенных факторов и особенностей развития увлажнения различных территорий [42].

Установлено, что большую роль в формировании водного режима играют периодические изменения в поступлении различных воздушных масс в результате развития разнообразных циркуляционных процессов атмосферы. Этим процессом и обусловлено становление более влажного климата в большей части Мира. Однако в субтропических районах северного полушария между 10-й и 30-й параллелями наблюдается снижение уровня атмосферных осадков. В районах, обычно подверженных засухам, засушливые периоды становятся более продолжительными и суровыми. Установлено, что общий объём воды в таких крупнейших бассейнах рек – Нигера, Сенегала, и озера Чад сократился на 40–60%.

Применительно к гидроклиматической составляющей этой проблемы, исследования её медико-экологических аспектов включают широкий спектр научных задач, связанных с изучением возможных влияний на здоровье населения изменений обводнённости территории. При этом речь идёт не только о катастрофических последствиях наводнений, торнадо, селейных потоках и т.п., с огромным разру-

шительным потенциалом, приводящих к гибели людей, тяжёлому и масштабному травматизму, разрушению поселений. Медико-экологические последствия здесь очевидны и понятны. Мы же имеем в виду ситуации, связанные с постепенно накапливающимися изменениями обводнённости территории, приводящими к критическим последствиям.

Принципиальная и согласованная позиция Всемирной организации здравоохранения Программы ООН по окружающей среде и Всемирной метеорологической организации, сформулированная на Всемирной конференции по изменению климата в 2003 г., опирается на результаты целого ряда научных публикаций. Она отражает преобладающую точку зрения о негативном влиянии глобальных изменений климата на здоровье населения. [42].

На настоящем этапе изучения этой части общей проблемы нами использованы материалы изложенных выше специальных исследований крупномасштабных экологических кризисов с водным пусковым механизмом – Каспийского и Аральского, испытавших выраженное влияние повышения или понижения обводнённости территории. Наблюдавшиеся здесь процессы и явления, по нашему мнению, могут приниматься в качестве аналоговых природных моделей развития таких ситуаций в условиях глобальных гидроклиматических изменений.

Углублённый анализ этих материалов позволил обосновать ряд прогностических построений [39]. Так, варианты, возникающие в связи с повышением водности территории, прежде всего, будут зависеть от её ландшафта и интенсивности процессов подтопления и затопления. Очевидно, рассмотрение изменений медико-экологической обстановки имеет смысл применительно к периоду, когда сохраняется возможность существования поселений, хотя и в новых условиях среды обитания. При этом резкое повышение водности территории будет способствовать окружению сохраняющихся населенных мест застойными водоёмами, не пригодными для питьевого и бытового использования. Качество поверхностных водоисточников деградирует в связи со смывом с поверхности вредных веществ, бактериальных и паразитарных загрязнений. Усугубление этих процессов будет связано с затоплением децентрализованных канализационных сооружений, а на морских побережьях – в результате сме-

шения морских и речных вод. Особое значение для микробного и паразитарного загрязнения вод приобретет затопление скотомогильников, септиков, мест содержания и выпаса скота. Деградация качества подземных водоисточников будет связана с их гидравлическими связями с загрязненными поверхностными водами. Повышение уровня стояния грунтовых вод повлечёт за собой ухудшение микроклимата жилищ и ускорение разрушений жилого фонда. Можно прогнозировать расширение ареалов обитания тяготеющих к воде переносчиков и возбудителей паразитарных заболеваний, повышение их численности на сохраняющихся участках суши. За счёт нарушения транспортных коммуникаций и очевидного сокращения сельскохозяйственных угодий, снабжения продуктами ухудшатся условия и характер питания населения изолированных поселений. Изменение характера трудовой занятости населения, повлечёт за собой изменения его социально-психологического статуса и рост профпатологии.

Опираясь на результаты ранее упомянутых исследований [33], был предложен сценарий возможного влияния изменения гидрологической обстановки на медико-экологическую ситуацию в условиях глобальных гидроклиматических изменений [40]. Такие изменения среды обитания человека позволили прогнозировать очевидное ухудшение санитарно-эпидемиологической обстановки, вызываемое загрязнением вод и интенсификацией водного пути передачи инфекционных, паразитарных, природно-очаговых и особо опасных инфекций, что ведёт к нарастанию уровней инфекционной и паразитарной заболеваемости. В связи со снижением иммунологического статуса, особенно детского населения, вследствие нарастания белково-витаминного дефицита, (связанного с неполноценным питанием), а также в результате расширения зон паразитарной поражённости, можно прогнозировать интенсификацию роста инфекционной и неинфекционной заболеваемости, поскольку речь идёт о снижении иммунитета и адаптационных способностей организма. Можно предположить существенное нарастание числа случаев аллергических, кожных, желудочно-кишечных, сердечно-сосудистых, эндокринных заболеваний, снижения иммунитета, особенно среди наиболее ранимого детского контингента. Несомненно и воздействие всего комплекса негативных социальных явлений, связан-

ных с активизацией процессов миграции населения (ухудшения условий проживания, изменения трудовой занятости, характера питания). В целом это создаст дополнительные предпосылки для распространения инфекционных заболеваний, прежде всего кишечных, на территориях вне зоны затопления или подтопления за счёт инфицированных переселенцев.

Целевая направленность оздоровительных мероприятий должна обеспечить снижение отрицательных для жизнеобеспечения последствий затопления и подтопления территорий – сокращения или исчезновения селитебных зон, ухудшения условий проживания в связи с повышением уровня стояния грунтовых вод, биологического и химического загрязнения водноземельных ресурсов, деградации водоисточников, сокращения полезных сельскохозяйственных угодий и числа народнохозяйственных объектов, нарушения транспортных коммуникаций, снижения уровня пищевой обеспеченности, существенных осложнений деятельности профилактических и лечебных служб здравоохранения. Реализация этих мероприятий может рассматриваться применительно к планируемым вариантам защиты морского побережья от затопления, подтопления и нагонных явлений. Предварительный экспертный прогноз медико-экологических последствий варианта без мер берегозащиты и варианта с частичной защитой побережья в местах расположения важных народнохозяйственных объектов и крупных сложившихся поселений, свидетельствует о сравнительной идентичности негативных последствий по характеру влияния на санитарные условия жизни и состоянию здоровья населения. В обоих случаях возникает необходимость переселения населения (в первом случае всего, а во втором – его части), что требует проведения широкого комплекса мероприятий для его жизнеобеспечения и предотвращения ухудшения санитарно-эпидемиологической обстановки в новых или расширяющихся существующих поселениях. При варианте с частичной берегозащитой появление островных или полуостровных поселений сопровождается ухудшением условий жизнеобеспечения и санитарно-эпидемиологической обстановки. Выбор того или иного варианта мероприятий по защите побережья зависит от соображений народнохозяйственной и экономической целесообразности и должен базироваться на прогнозе изменений гидроло-

гической обстановки. Существует и III вариант – создание берегозащитных сооружений длительной протяженности, охватывающий всё побережье, где прогнозируются подтопления и затопления. Очевидно это наиболее привлекательный, но экономически крайне дорогостоящий вариант. Тем не менее, он уже применяется в некоторых странах, где уже ощутимы последствия повышения уровня морских вод.

Изменения медико-экологической обстановки в связи с понижением водности территории – дегидратацией, аридизацией и опустыниванием – в зонах влияния глобальных трансформаций климата также можно было прогнозировать в общем виде. При этом доминирующим становится прямое и косвенное воздействие водного фактора на качество среды обитания человека со всеми вытекающими отсюда последствиями для здоровья населения. Очевидная для этих условий деградация количества и качества вод суши, в том числе используемых для коммунально-бытовых целей, позволяет прогнозировать нарастание их биологического и химического загрязнения. Исчезновение полноценных водоисточников вызовет необходимость использования случайных загрязнённых водных объектов. Если это водные артерии с сокращающимся в силу аридизации территории стоком, то при сохранении количества и состава, сбрасываемых в них сточных вод различного генезиса, функции разведения и самоочищения сначала снизятся, а затем и вообще исчезнут. Однако даже при снижении объёма сточных вод сохранение ранее накопившихся в донных осадках загрязняющих веществ может повлечь за собой вторичное загрязнение речных водотоков.

Для орошаемых сельскохозяйственных территорий с интенсивным применением пестицидов сброс коллекторно-дренажных вод в условиях нарастающей аридизации окажется крайне неблагоприятным фактором загрязнения природных водных объектов и засоления вод. Количественная и качественная деградация речного стока неминуемо отразится на состоянии водных объектов – реципиентов. Правоммерно ожидать снижения их водности, нарастания солёности, существенных изменений внутриводоемных экосистем. Рыбопромысловое значение таких водоёмов окажется существенно сниженным или вообще потерянным.

В условиях выраженного понижения водности территории также следует ожидать неблагоприятные изменения уровня здоровья населения в связи с деградацией качества среды обитания человека, её водного, атмосферного и почвенного компонентов. Опасными для здоровья населения станут биологическое (микробное, паразитарное) и химическое загрязнение водоисточников, атмосферного воздуха (пыле-солевые воздействия), снижение качества и количества продуктов питания, в том числе витаминов, незаменимых белков и т.п. Характер этой заболеваемости будет зависеть от состава приоритетных для данной территории загрязняющих веществ, что в свою очередь связано с особенностями её промышленного и сельскохозяйственного освоения. Снижение водности территории будет менять и её паразитарный профиль, повышая значение влагонезависимых переносчиков паразитарных заболеваний, с одной стороны, и вызывая миграцию влаголюбивых животных-переносчиков, расширяя ареалы некоторых природно-очаговых и особо опасных болезней (например, туляремии, чумы) – с другой.

Патогенетическое (болезнетворное) значение выделенных выше факторов будут усиливать неблагоприятные трансформации социальной сферы: изменения трудовой занятости, сокращение местного производства продуктов питания, усиление миграционных процессов и др. Т.о, исследования констатировали, что при необратимости и нарастании наблюдаемых уже сегодня глобальных гидроклиматических изменениях, возникает необходимость крупномасштабных мероприятий для смягчения последствий развития новой климатической ситуации, как на национальном, так и на международном уровне. Очевидна необходимость их ориентации на минимизацию влияния антропогенных причин климатических трансформаций и на развитие целенаправленных медико-профилактических мероприятий, ориентированных на защиту населения от воздействия негативных изменений факторов среды обитания человека.

К исследованию этой проблемы также относятся новые исследования ИВП, связанные с риском глобальной вирусной инвазии в связи деградацией криолитозоны в условиях нарастающего потепления климата. Результаты первого периода исследований этой проблемы уже приняты в периодическую научную печать для пуб-

ликации в 2017 г. Дзюба А.В., Эльпинер Л.И. Деградация криолитозоны и риск глобальной вирусной инвазии (в журнал «Вода – химия и экология»); Эльпинер Л.И., Дзюба А.В. Медико-экологические аспекты деградации зоны многолетней мерзлоты: проблема палеовирусной контаминации (в журнал «Гигиена и санитария»).

Для смягчения медико-экологических последствий климатических изменений настоятельно требуется прогностическое обеспечение управленческих решений в области рационального использования и охраны водных ресурсов, позволяющее учитывать интересы охраны здоровья населения в связи с антропогенными и природными изменениями гидрологической и гидрогеологической обстановки в новых климатических условиях. Оно может быть реализовано на базе целевой комплексной программы исследований, в выполнении которой необходимо участие институтов РАН, МП крупным Р, Минсоцразвития РФ, Госкомгидромета РФ и других министерств и ведомств, связанных с природопользованием. Содержание такой программы должно обязательно включать медико-экологические исследования проблемы использования подземных вод.

Подземные воды. В ситуации, когда деградация качества поверхностных вод, связанная с мощным антропогенным прессом, приобретает всё большее значение, особое внимание уделяется подземным водам, в целом ряде случаев сохраняющим высокие показатели качества. Медико-экологические аспекты проблемы использования подземных вод в настоящее время, в основном, связаны с обеспечением полноценного и безопасного для здоровья населения хозяйственно-питьевого водопользования. Для решения комплекса всех возникших на рассматриваемом направлении задач был необходим междисциплинарный подход, предусматривающий комплексное использование методов гидрогеодинамики, гидрогеохимии, геоэкологии и профилактической медицины. Направленность такого подхода на получение целевой информации для оценки и прогнозирования влияния качества подземных вод на здоровье населения должна была обеспечить выбор экологически безопасных подземных водоисточников. Поэтому развитие полноценного медико-экологического направления исследований гидрогеологической ориентации оказалось тесно связанным с использованием современных гигиенических, экологических, социально-демографических и меди-

ко-географических подходов. Базирование исследований медицинского профиля на полноценную гидрогеохимическую информацию, требовало достаточную взаимную осведомлённость специалистов об исходных предпосылках намечаемых совместных работ [38].

Проведённый анализ интенсивно накапливающейся отечественной и зарубежной гидрогеологической информации, свидетельствовал о существенных изменениях представлений о безопасности подземных вод для здоровья населения, особенно на тех территориях, где в силу различных обстоятельств нарушаются природные условия формирования и сохранения их качества. Формирующийся банк медико-экологических данных всё с большей очевидностью демонстрировал причинно-следственные связи инфекционной и неинфекционной заболеваемости населения с ухудшением качества воды подземных питьевых водоисточников [34]. Наряду с оценкой роли антропогенных загрязнений подземных вод, значение приобретало определение значимости их природного химического состава, как макро-, так и микроэлементного. В сложившейся новой ситуации возникла необходимость совершенствования научных основ оценки качества и охраны подземных вод [34, 45].

В гидрогеологии сформировалась новая проблема, требующая развития фундаментальных и научно-практических исследований с целью определения эффективных мер безопасного для здоровья населения использования подземных вод в условиях интенсивного техногенеза [28, 45].

Анализ информации, накопленной контролирующими службами, заставлял по-новому рассматривать и природные компоненты состава подземных вод. Прежде всего, их повышенную минерализацию. Например, подземных вод юга России, Поволжья, где величина общего содержания в ряде случаев достигает 8000–10000 мг/л. Научные источники свидетельствовали о причинно-следственных связях сердечно-сосудистой патологии с содержанием в разных соотношениях Ca и Mg, о протекторной роли этих элементов (при умеренных их количествах) по отношению к некоторым токсичным микроэлементам, например Cd. Появились и эколого-токсикологические исследования, определившие причинно-следственные связи патологии беременности и родов с использованием для питья подземных вод повышенной до 2,5–3,5 мг/л минерализацией [34].

В связи с достаточно широким распространением подземных вод повышенной минерализации и необходимости применения опреснения для их использования в питьевых целях, возникла необходимость рассмотрения медико-экологических аспектов этой, казалось бы, только технической проблемы. Результаты значительно ранее проведённых исследований уже в то время послужили основанием для выдвижения пионерной гипотезы о физиологической роли солевого состава питьевой воды [20]. Именно в этой связи впервые были сформулированы основные принципиальные представления об оптимальном солевом составе питьевой воды, включающие, кроме требований безвредности её химического состава, критерии обеспечения оптимальных функциональных реакций организма с учётом процессов, протекающих на уровне клетки, отдельного органа или систем организма в целом. Анализ данных о физиологической полноценности питьевой воды позволил сформулировать требования к кондиционированию опреснённой воды, с учётом приемлемого диапазона её солевого состава, гидрохимического класса, соотношения макро- и микроэлементов [1].

Переход от современных подходов, ограничивающих лишь верхние, предельно допустимые концентрации тех или иных веществ в питьевой воде по органолептическим и токсикологическим признакам вредности, к оптимизационному подходу, оценивающему физиологическую (точнее, биологическую) полноценность воды, несомненно, отражает наиболее прогрессивные тенденции развития учения о питьевых водах. До последнего времени такой подход касался лишь установления оптимального уровня содержания в питьевой воде фтора.

Разработка научных основ и методов комплексных гидрогеоэкологических и медико-экологических оценок условий использования подземных вод в зонах их техногенного загрязнения и проявления природных аномалий химического состава была проведена ИВП и Геоцентром «Москва». На основе изучения гидродинамических, гидрогеохимических и гидрогеологических особенностей формирования качества подземных вод Московского региона, используемых для питьевых целей, выявлены зоны распространения подземных вод с повышенным содержанием вредных веществ природного и антропогенного генезиса (Sr, Ba, B, F, Li, Fe, соли жесткости). Была обос-

нована необходимость разработки новой методологии комплексного гидроэкологического и медико-экологического подхода к оценке использования подземных вод для питьевых целей в условиях интенсивного техногенеза [28].

В рамках предложенной методологии были разработаны методики интегральных медико-экологических оценок и прогнозов, включающие гидрогеоэкологическое и медико-экологическое изучение качества воды на водозаборах подземных вод и моделирование гидрогеомиграционных процессов. Были предложены позиции мониторинга здоровья населения в связи с использованием существующих и новых подземных водоисточников в зонах их техногенного загрязнения и проявления природных аномалий химического состава. Обоснованы подходы к установлению приоритетных показателей, определены особенности формирования качества подземных вод на промышленно освоенных урбанизированных территориях, характер его изменений при современной системе смешения и обеззараживания вод различных горизонтов [11].

В качестве основного подхода предложено комплексное медико-экологическое и гидрогеоэкологическое районирование территории. Целью его является установление (выделение) природных таксонов, в пределах которых существует опасность антропогенного загрязнения подземных вод или проявления природных аномалий их состава, ранжирование их по относительной мере такой опасности.

Предложенные подходы к такому районированию предусматривали создание комплекса карт, отражающих обусловленные позиции таксонизации территории. Масштаб и структура карт должны быть идентичны картам гидрогеоэкологического районирования, что обеспечивает возможности получения совместимых данных. Так как медико-демографические данные, чаще всего, даются по административным единицам, границы таксонов должны отражать административное районное деление. Для использования имеющейся картографической информации и для её более полного анализа разработаны методы адаптации географических информационных систем (ГИС) к комплексному медико-экологическому и гидрогеоэкологическому районированию территорий по критериям опасности загрязнения подземных вод. При этом отмечена необходимость анализа массивов имеющейся медико-демографической,

географической, гидрогеологической информации для обнаружения взаимосвязей [16,35].

Предложенный подход был апробирован в Московском регионе, применительно к оценке опасности загрязнения подземных вод высокотоксичным антропогенным загрязнением – диоксинами. Обоснованы виды и источники необходимой информации и способы её анализа. При этом обобщена и систематизирована информация о диоксиногенных источниках загрязнения подземных вод и проведено картографирование их размещения в пределах региона. Дана оценка возможности миграции диоксинов в водовмещающей толще горных пород и зоне аэрации. Обобщены и систематизированы данные об эксплуатации водоносных горизонтов, использующихся в целях хозяйственно-питьевого водоснабжения, размещения водозаборов и месторождений подземных вод. Проведён анализ размещения водозаборов относительно источников диоксиногенных загрязнений. Разработаны методы предварительной оценки загрязнения подземных вод этими высокотоксичными канцерогенными соединениями по данным содержания в водном растворе органических веществ, являющихся курьерами диоксинов. Апробированы способы моделирования гидрогеологической обстановки с целью установления вероятного времени транспортировки диоксинов в водоносные горизонты с учётом периода полураспада этих веществ в водной среде [11, 28].

С оценкой роли природных микроэлементов подземных питьевых вод были связаны и медико-экологические исследования ИВП в Смоленской области [35]. Ранжирование административных районов области по показателям качества подземных вод (1012 скважин) в сопоставлении с современными данными о влиянии отдельных их компонентов природного происхождения на здоровье человека, позволило сформулировать гипотезу о большой степени вероятности зависимости заболеваемости местного населения от присутствия в воде повышенных концентраций железа, солей жёсткости, марганца и стронция стабильного. Установлены статистически значимые связи между переломами конечностей у детей и повышенным содержанием стронция стабильного в воде, а также между повышенной жёсткостью и болезнями мочеполовой системы. По существу, была обоснована система определения целевых террито-

рий для проведения дальнейших о этапов эколого-эпидемиологических исследований в этом направлении, что является первым этапом работ по оценке риска влияния водного фактора («идентификация опасности»).

Материалы исследований медико-экологических аспектов использования подземных вод отражены в ряде научных публикаций в т.ч. в 2-х, изданных за рубежом, и 4-х – в РФ [7, 45 и др.].

Новая экологическая ситуация требовала и новых подходов к оценке качества подземных вод, и к формированию более интенсивной деятельности по их охране, обеспечению безопасного водопользования. Дальнейшие, более широкие перспективы развития фундаментальных медико-экологических исследований водных проблем были связаны с углублением и расширением современного учения о влиянии гидрологической обстановки на состояние здоровья и условия жизни населения в усугубляющейся экологической ситуации. В этой связи проявлена инициатива выделения самостоятельного междисциплинарного научно-дисциплинарного раздела науки о подземных водах – медицинской гидрогеологии. [37, 38].

Питьевая вода. Кризис питьевого водоснабжения. Медико-экологические исследования проблемы питьевого водоснабжения в ИВП изначально были связаны с «Десятилетием питьевой воды и санитарии» провозглашенным XXXV сессией Генеральной Ассамблеи ООН на период 1980-х гг. Глобальные масштабы этой проблемы в полной мере обозначились уже в 1977 на конференции ООН по водным ресурсам. Её материалы свидетельствовали о количественном и качественном дефиците питьевой воды, росте и масштабах заболеваемости населения, связанной с негативным влиянием водного фактора во многих странах мира. ООН призывала национальные и международные организации обратить самое серьёзное внимание на эту проблему, принять необходимые меры для её решения.

Результаты широкого круга целенаправленных научных исследований, проведённые с тех пор во многих странах мира, позволяют говорить о сформировавшейся сегодня глобальной проблеме качественного, а в ряде случаев количественного дефицита воды, отражающимся на состоянии здоровья населения в связи с использованием некондиционных питьевых вод поверхностных и подземных водоисточников. Острая необходимость решения задач полноцен-

ного и безопасного водоснабжения населения, как важнейших и первостепенных, подчеркивается положениями целого ряда крупных международных документов. Серьёзность ситуации заставила Генеральную Ассамблею ООН объявить 2005–15 гг. Международным десятилетием действий «Вода для жизни».

Для РФ это острейшая проблема, заслуживающая специального, отдельного рассмотрения. В последние годы речь идёт о кризисе питьевого водоснабжения, связанном с комплексом обозначившихся законодательно-правовых, экономических, экологических и технологических проблем. В сложившихся кризисных условиях функционирования водохозяйственной отрасли доминирующий характер приобретает необходимость определения мероприятий направленных на обеспечение полноценного и безопасного питьевого водоснабжения в городах и населённых пунктах.

Современные данные о качестве питьевой воды определяют их высокую значимость при определении путей преодоления сложившейся в стране демографической ситуации [36]. По официальным данным, хуже чем в РФ показатели смертности только в Афганистане, Нигерии, Сомали и на Украине. В структуре причин смертности населения РФ первые два места занимают заболевания сердечно-сосудистой системы и новообразования. О негативной роли питьевой воды здесь свидетельствуют результаты эколого-эпидемиологических исследований, проведенных и за рубежом, и в нашей стране. Также, по официальным данным, связь повышенной заболеваемости раком с наличием в питьевой воде канцерогенов установлена и в ряде населённых пунктов РФ [15]. Показано, что и фиксируемая повышенная сердечно-сосудистая заболеваемость связана с особенностями микро- и макроэлементного состава питьевых вод. На основе анализа данных 50-летнего периода наблюдений, выполненных в ряде стран, эксперты Европейского Центра Окружающей среды и Здоровья (Рим, 2003) признали, что гипотеза о связи потребления жёсткой воды с частотой сердечно-сосудистых заболеваний верна, а важнейшей полезной составляющей следует считать магний. Отечественные и зарубежные эколого-токсикологические и эколого-эпидемиологические исследования также свидетельствуют о способности химических органических и неорганических антропогенных загрязнений питьевых вод вызывать заболевания выделительной,

пищеварительной, костно-мышечной, нервной, иммунной систем, опорно-двигательного аппарата, вызывать аллергии, дефекты развития, заболевания наследственной природы [47]. Кроме того, необходимо было учитывать, что в питьевой воде ряда населённых мест обнаруживались антропогенные загрязняющие вещества, вызывающие сердечно-сосудистую патологию [15].

В проблеме качества питьевой воды ещё недостаточно оценена значимость функционального состояния экосистем воды и суши в формировании патогенных проявлений водного фактора.

Изучение этого вопроса показало, что сведения о водном факторе возникновения неинфекционных заболеваний сейчас пополняют новые отечественные и зарубежные исследования. Они, свидетельствуют о том, что такой гидробиологический процесс, как евтрофирование («цветение») водоёмов, вызванное интенсивным развитием ряда водорослей, главным образом сине-зелёных, сопровождается выделением в воду ряда токсичных органических соединений, способных накапливаться в воде и в гидробионтах и вызывать при её употреблении болезнетворные эффекты [22, 44]. Эти данные углубляют представления о недоброкачественности вод евтрофированных водоёмов. Ранее они ограничивались сведениями об их низких органолептических свойствах (запахах), проявляющихся при обработке воды на водопроводных станциях. Напомним, что пусковые механизмы евтрофикации вод связаны с избыточным поступлением биогенных элементов (азота и фосфора), имеющим антропогенный генезис.

Сведения о токсичности воды евтрофных водоёмов придают особое значение гидробиологическим прогнозам этих процессов, открывая пути их новой, медико-экологической интерпретации. Учёт этого обстоятельства при рассмотрении, например, гидротехнических управленческих решений приобретает новое значение. Нельзя не подчеркнуть, что доказательства причинно-следственных связей неинфекционной заболеваемости населения с водным фактором, требуют проведения методически весьма трудоёмких и сложных исследований, участия высококвалифицированных специалистов и серьёзного финансирования. Очевидно, именно с этим связан ограниченный территориальный диапазон таких работ на территории России. Однако это никак не оправдывает их недоста-

точную развитость, зависящую от степени осознания проблемы на государственном уровне.

Разделы настоящей статьи свидетельствуют о том, что медико-экологические аспекты питьевого водоснабжения постоянно доминировали во всех исследованиях, связанных с изучением влияния гидрологической и гидрогеологической обстановки на здоровье населения.

Однако, первым этапом медико-экологических исследований в области питьевого водоснабжения, проведённых в 1980-х гг., явился анализ передового опыта решения возникающих здесь задач на примере одной из индустриально развитых стран, в частности США. Проведение этой работы совместно с Институтом США и Канады АН СССР позволило рассмотреть комплекс водно-ресурсных, нормативно-правовых, медико-биологических, экологических, организационных, социальных, технико-экономических, и политических аспектов проблемы питьевого водоснабжения населения. Результаты этой работы отражены в вышедшей в 1983 г. монографии «Проблемы питьевого водоснабжения в США» [21]. Её выводы свидетельствовали о наличии целого ряда общих для обеих стран задач, связанных с решением проблемы питьевого водоснабжения. К ним были отнесены количественное и качественное истощение водоисточников в ряде регионов, нарастание безвозвратного водопотребления в связи с развитием систем оборотного водоснабжения, необходимость совершенствования стандартов качества природной и питьевой воды, экономические трудности их реализации. Исследования показали, что перенос центра тяжести решения проблемы в область медико-экологических аспектов, выделение приоритетов охраны здоровья населения при определении параметров устанавливаемых стандартов и принятии законодательных решений оказывается наиболее результативным. Была показана слабость корректировки нормативов качества питьевой воды экономическими соображениями, как это было принято в США и до сих пор является предметом устремлений некоторых наших чиновников.

В тоже время, стала очевидной необходимостью формирования общих подходов к решению проблемы питьевого водоснабжения с учётом специфики сложившейся в нашей стране экологической и

экономической обстановки. В этом направлении и были ориентированы дальнейшие исследования по данной проблеме [36].

В сложившихся кризисных условиях функционирования водохозяйственной отрасли доминирующий характер приобретала необходимость обоснования мероприятий, направленных на обеспечение полноценного и безопасного питьевого водоснабжения в городах и населённых пунктах. К числу неотложных мер было отнесено совершенствование нормативной базы, определяющей качество питьевой воды и совершенствование водоохраных мероприятий. Возникла необходимость преодоления устаревших и уже неадекватных подходов к формированию системы контролируемых показателей на основе единого учёта региональных особенностей качества вод, гигиенических критериев выбора приоритетных показателей и эффективных технологических решений.

Скоординированные исследования ИВП, ИП РАН, Центра медицинской демографии Института системного программирования РАН, Геоцентра «Москва», НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды РАН, ВНИИ ВОДГЕО позволили исследовать проблему питьевого водоснабжения, поэтапно решая упомянутые выше задачи.

Проведенные методологические разработки, прежде всего, были посвящены исследованию системы «качество вод суши – питьевая вода – здоровье населения» [41]. Обобщение и анализ данных о закономерностях формирования качества воды водоисточников в условиях развивающейся деградации качества поверхностных и подземных водных потоков открывали возможности картографических построений, отражающих пространственно-временные особенности качества воды водоисточников по степени опасности и интенсивности антропогенных и природных включений, используя медико-экологические критерии. Привлечение и обобщение данных о качестве питьевой воды, используемой населением, с учётом эффективности барьерной роли кондиционирующих сооружений, современной технологической, нормативной и контрольно-аналитической базы расширяло эти представления, позволяя оценить степень эффективности существующей системы водоохраны и водоподготовки.

Результаты анализа фондовых данных контрольно-аналитических служб и материалов научных исследований, свидетельствовали

о непригодности большинства водных объектов РФ для всех видов водопользования населения по характеру и интенсивности антропогенного загрязнения. Изучение региональных особенностей формирования качества воды поверхностных и подземных питьевых водоисточников РФ и питьевой воды, используемой населением, позволило оценить степень опасности и интенсивность загрязнения питьевой воды и учесть значительные масштабы использования её в некондиционном виде. При этом были учтены закономерности деградации качества вод суши в зависимости от интенсивности и характера антропогенного пресса в зонах формирования качества. Официальные данные и материалы научных исследований свидетельствовали о прямом и косвенном влиянии качества питьевой воды на характер и уровень инфекционной, неинфекционной и паразитарной заболеваемости населения РФ на основе эпидемиологически доказанных ситуаций [15].

Существенным разделом проведённых исследований питьевого водоснабжения явились разработки, обосновывающие необходимость использования регионального нормирования качества питьевых вод. Для этой цели были обобщены и проанализированы современные медико-статистические материалы и данные специальных научных исследований, устанавливающие причинно-следственные связи ряда инфекционных кишечных, неинфекционных, в т.ч. сердечно-сосудистых, онкологических и других заболеваний с качеством питьевой воды, различно выраженные в разных регионах. Предложенный региональный подход к нормированию качества питьевой воды нашёл отражение в СанПиН 2.1.4.559-96 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» и в проекте Федерального Закона – технического регламента «О безопасности питьевой воды», подготовленного ведущими специалистами НИИ Экологии человека и гигиены окружающей среды РАМН. Практическая реализация положений этого закона требует и новых подходов к оценке качества питьевых водоисточников, как подземных, так и поверхностных, и к формированию более интенсивной деятельности по их охране, обеспечению безопасного водопользования. Принципиально новым здесь является не только существенное расширение круга нормируемых показателей, но и открывающиеся воз-

возможности построения региональных нормативных документов. Последнее связано с введением т.н. «рабочих программ производственного контроля качества воды» на основе установления нормируемых показателей применительно к местной ситуации. Практическая деятельность в этом направлении здесь также должна опираться на районирование территории по степени опасности и интенсивности антропогенных загрязнений поверхностных и подземных источников питьевой воды, а так же по характеру и уровню заболеваемости связанной с водным фактором. Т.о. вышеизложенная методология медико-экологического районирования приобрела здесь ключевое значение. Предложенный подход позволял определить характер и очередность необходимых на различных территориях мероприятий и капиталовложений, что особенно существенно в сложных экономических условиях. Непосредственное отношение к этим работам имеют изложенные выше исследования, связанные с использованием подземных вод.

В целом, разработанная стратегия преодоления сложившейся гидрогеологической обстановки, базировалась на обеспечении приоритетов здоровья населения и экосистемном подходе при решении управленческих водохозяйственных задач. Проблема питьевого водоснабжения здесь занимает приоритетные позиции. Особого внимания требовало изучение особенностей формирования качества питьевой воды в условиях интенсивного техногенеза на региональном и субрегиональном уровне.

Междисциплинарный характер этой проблемы определял необходимость дальнейшего развития совместных медико-экологических, гидрологических, гидрогеологических и технико-экономических подходов к созданию безопасных условий питьевого водоснабжения населения в соответствии с новыми российскими нормативными документами. Требуется и дальнейшее совершенствование методов установления причинно-следственных связей состояния здоровья населения с водным фактором. Возникающие при этом исследовательские задачи связаны с созданием единой методологии и унифицированных методов экологической эпидемиологии и экологической токсикологии. Решение этой задачи в настоящее время решается методами оценки риска для здоровья населения при воздействии веществ, загрязняющих окружающую среду [18].

Необходимость дальнейшего развития этих работ продиктована и интересами совершенствования системы управления водными ресурсами.

Управление водными ресурсами предусматривает использование активных приёмов изменения гидрологической обстановки (режимов, качества и количества вод) в интересах улучшения экологических и социальных условий жизни населения, полноценного функционирования всех отраслей хозяйства. При этом решается широкий диапазон задач, связанных с водообеспечением промышленных, коммунальных, рекреационных, сельскохозяйственных, транспортных, энергетических, природно-заповедных и других объектов и территорий [10]. По существу, решаются задачи распределения и охраны водных ресурсов с учётом приоритетов тех или иных интересов в конкретных территориальных условиях с использованием гидротехнических и/или регламентирующих приемов. Эти задачи неизбежно приобретают комплексный характер и требуют рассмотрения на основе системного подхода. В полной мере это относится и к такой общегосударственной проблеме как охрана здоровья населения [15, 26]. Применительно к управлению водными ресурсами речь идет об использовании активных приёмов изменения гидрологической обстановки (режимов, качества и количества вод) в интересах улучшения экологических и социальных условий жизни населения, его здоровья, полноценного функционирования всех отраслей хозяйства.

Для обеспечения эффективных управленческих водохозяйственных решений, соподчинённых приоритетам охраны здоровья населения, необходимо получение достаточно надёжных данных, характеризующих медико-экологическую ситуацию, связанную с гидрологическими или гидрогеологическими условиями водопользования. Без прогнозов её изменения во времени и пространстве правильный выбор таких решений маловероятен. Эти исследования должны обеспечивать надёжные основы для выбора безопасных водисточников и (или) совершенствования охраны вод и технологий водоподготовки, а также безопасных зон водных рекреаций.

Изучение проблемы управления водными ресурсами позволило разработать концепцию, обосновывающую необходимость учёта интересов охраны здоровья населения при формированием управ-

ленческих решений в области рационального использования и охраны водных ресурсов [33]. Проведённые исследования показали, что задачи, возникающие в связи с формированием того или иного водохозяйственного управленческого решения могут быть эффективно решены лишь при условии применения медико-экологического междисциплинарного подхода, объединяющего природоведческие и медицинские дисциплины. Практически это означало базирование оценочных и прогностических медико-экологических построений на аналогичных проработках смежных дисциплинарных направлений – гидрогеологическом, геологическом, технико-технологическом, социально-экономическом. На практике это связано с обеспечением научных исследований медико-экологических последствий принятия того или иного варианта. Иными словами – обеспечивать эффективные управленческие водохозяйственные решения, соподчинённые приоритетам охраны здоровья населения. Для реализации этой позиции был предложен алгоритм построения обосновывающих медико-экологических исследований [33], базирующийся на принципах ранее разработанного междисциплинарного медико-экологического подхода.

Управление трансграничными водными объектами. Проблема рационального и безопасного использования трансграничных водных ресурсов не нова для современной цивилизации. Попытки юридического оформления общего пользования международных рек предпринимались начиная с 19 в. Ещё в 1815 г. странами бассейна Рейна было заключено первое соглашение о судоходстве. К середине 1990-х гг. в Европе и Северной Америке действовало около 150 двух- и многосторонних соглашений об использовании и охране трансграничных водотоков. Однако, речь в них шла, в основном, о навигации, а иногда о производстве электроэнергии.

Насущная необходимость учёта интересов природопользования в бассейнах рек, обострение проблемы загрязнения воды в международных реках и деградация их экосистем предопределили необходимость создания или укрепления международно-правовой и институциональной базы, способной обеспечить противодействие экологической угрозе. Сейчас организационно оформленное сотрудничество существует во многих больших международных бассейнах, и касается двух или более стран. Речь уже идёт о предуп-

реждении загрязнения, сохранении водности водотоков, т.е. об обеспечении экологической безопасности [10].

В настоящее время в мире насчитывается 245 речных бассейнов, используемых на территориях двух или нескольких государств. В их границах проживает 40% населения мира. В Европе опыт сотрудничества путём заключения соглашений и создания международных органов накоплен в бассейнах рек Дуная и Рейна, Мааса (Франция, Бельгия, Нидерланды), Мозеля (Бельгия, Франция, Люксембург), Саар (Франция, ФРГ). На других континентах примерами сотрудничества могут быть бассейны рек Меконга, Ганга, Нила, Св. Лаврентия, Колорадо и других.

Важным здесь является осознание на международном уровне бассейнового принципа регулирования природопользования, охраны и воспроизведения природно-ресурсного потенциала, предусматривающего эффективность этой деятельности в пределах всей речной системы. Общие принципы сотрудничества и координации действий стран в обозначенной области заложены в «Конвенции Европейской Экономической Комиссии ООН об охране и использовании трансграничных водотоков и международных озёр» (1992 г.); в Конвенции о праве несудоходных видов использования международных водотоков (1997 г.); в Рамочной Директиве Совета ЕС по Воде (2000 г.); в Лондонском протоколе «Вода и здоровье» к Конвенции ЕЭК ООН «Об охране и использовании трансграничных водотоков и международных озёр» (1997 г.). Для учёта интересов охраны здоровья населения все перечисленные документы учитывают медико-экологические аспекты, упоминающиеся, однако, в самом общем виде.

Принципиальной моделью для решения трансграничных экологических проблем в регионах может служить упомянутая Конвенция ЕЭК ООН, которая охватывает все аспекты, связанные с использованием и охраной вод, включая обмен информацией, совместные научные исследования, координацию нормативно-правовых документов, внедрение совместных систем мониторинга, координацию водохозяйственных и водоохраных мероприятий, экологическое образование [12]. Однако было бы большим преувеличением утверждать, что сформулированные принципы полноценно учитываются многими странами (особенно развивающимися) в силу ограниченных экономических возможностей. Удачным примером выполне-

ния требований по обеспечению качества воды трансграничного водотока является улучшение воды р. Колорадо (США, штат Аризона) поступающей в Мексику. Американцы создали на приграничной территории завод для периодического опреснения речной воды системами обратного осмоса (100 млн галлонов/сутки – 262 м³/мин), сбрасываемой обратно в реку для выравнивания качества воды до регламентируемого уровня. При личном ознакомлении с этим объектом особое внимание привлекли десятки объединённых единой управляющей системой ветровых энергоисточников, обеспечивающих значительное снижение необходимого здесь финансирования.

Проведённые исследования показали, что оценка медико-экологических последствий реализации того или иного трансграничного водохозяйственного соглашения должна учитывать возможные последствия для различных сфер среды обитания человека (вода, воздух, почва), состояние которых способно влиять на санитарные условия жизни и состояние здоровья населения. При этом важна оценка воздействия трех групп факторов – биологических (бактериологических, вирусных и др.), физических (механических, электромагнитных, радиационных и др.), химических (отдельные вещества, группа веществ и др.) и определить характер (токсикологическое, радиационное, тепловое, шумовое, биологическое) и степень воздействия (сильная, умеренная, слабая, нарастающая, убывающая), его масштаб во времени (от необозримого до быстро исчезающего) и пространстве (от глобального до локального) с учётом зоны влияния. Здесь было необходимо использование и экосистемного подхода. Одним из эффективных разделов такой оценки явилось рассмотрение вероятных изменений сложившейся медико-демографической ситуации и санитарно-эпидемиологической обстановки, характеризующихся вероятными изменениями обводнённости территории, в т.ч. и при избыточном водопотреблении на сопредельной территории [31].

Исследование этой проблемы делало очевидным, что при трансграничном использовании того или иного водного объекта защита здоровья населения, как на территории донора, так и на «принимающей» территории необходимо достаточное развитие системы социально-гигиенического мониторинга, и медико-экологического районирования, что существенно облегчило бы получение полноценных данных, характеризующих зависимости показателей здоро-

вья населения от характера воздействия биологических и химических компонентов вод [31].

То задачи, возникающие в связи с формированием международных соглашений в области использования трансграничных вод, могут эффективно решаться лишь при условии применения медико-экологического, междисциплинарного подхода, объединяющего природоведческие и медицинские дисциплины. Практически это означает базирование оценочных и прогностических медико-экологических построений на аналогичных проработках смежных дисциплинарных направлений – гидрогеологическом, геологическом, технико-технологическом, социально-экономическом. На практике это связано с проведением научных исследований медико-экологических последствий принятия того или иного варианта соглашения. Для практической реализации этого положения представляется возможным использование выше упомянутого алгоритма построения обосновывающих медико-экологических исследований [33].

Изложенные в данном разделе материалы приобретают особое значение в связи с появляющимися проектами возрождения идей переброски части стока сибирских рек в Китай и Казахстан. В свете приведённых выше международных Конвенций, использование этого гидротехнического способа окажется возможным только при условии огромных капиталовложений в систему водоохраных мероприятий, например, на Иртыше, водность которого и качество воды уже сейчас требуют принятия энергичных мер для обеспечения его экологического благополучия и полноценного водопользования всех потребителей [32].

В заключение следует подчеркнуть, что результативность медико-экологических исследований водных проблем в ИВП РАН была обеспечена взаимодействием с ведущими научными центрами профилактического медицинского профиля и смежных немедицинских научно-дисциплинарных природоведческих направлений. Такому характеру исследований активно способствовали и Научный совет РАН по проблемам биосферы и Научный совет РАН по проблемам Каспия, и Российская экологическая академия и РАЕН. Это касается и тесных научных связей и внутри самого ИВП, прежде всего с гидрогеологами. Существенную роль сыграли многолетние поддержки крупных государственных научных фондов – РФФИ и РНФ. Интерес

к этим работам постоянно проявляли организаторы многих крупных отечественных и зарубежных научных конгрессов, что не только свидетельствовало о значимости ведущихся исследований, но и обеспечивало упрочение новых междисциплинарных подходов. Нельзя не отметить и внимание весьма значимых международных организаций, таких как ООН и ВОЗ, «Врачи без границ», неоднократно рассматривавших в своих профильных отделах и на совещаниях доклады об итогах проведенных изысканий. Поддержка работ ИВП на ежегодных объединённых пленумах АМН и Минздрава РФ позволяет отметить, что медико-экологическому направлению исследований не следует противопоставлять фундаментальный и научно-практический гигиенический подходы к оценке и прогнозированию влияния водного фактора на условия жизни и здоровье населения. Они всё более и более дополняют друг друга, взаимно адаптируя и развивая основные принципиальные положения каждого из них. Об этом свидетельствует и отмеченное выше постоянное участие ведущих научных центров профилактического профиля системы здравоохранения в исследованиях проводимых в ИВП РАН.

Необходимо указать, что за 40 лет развития данного направления банк данных о причинно-следственных связях заболеваемости населения с водным фактором не только сохранил свою значимость, но и существенно расширился. Исследования эти идут во всем мире, постепенно приобретая медико-экологическую направленность, свойственную исследованиям ИВП РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Санин М.В., Эльпинер Л.И. Опреснение солёных и солоноватых вод как глобальная проблема // Известия АН СССР. Сер. геогр. №86, 1983. С. 18–29.
2. Авакян А.Б., Эльпинер Л.И. Медико-биологические аспекты проблем крупномасштабного перераспределения речного стока // Водные ресурсы. №6, 1979. С. 25–36.
3. Авакян А.Б., Эльпинер Л.И., Делицин В.М. Медико-биологические проблемы гидротехнического строительства // Гидротехническое строительство. №10, 1987. С. 19–21.
4. Беэр С.А., Эльпинер Л.И., Воронин М.В. Паразитарные системы и водный фактор (подходы к районированию территории речных бассейнов по паразитологическим критериям) // Медицинская паразитология. №4, 2011. С. 18–24.

5. Баренбойм Г.М., Чиганова М.А. Загрязнение природных вод лекарственными. М.: Наука, 2015. 283 с.

6. Водохранилища и их воздействия на окружающую среду (отв. ред. Г.В. Воропаев, А.Б. Авакян). М.: Наука, 1986. 367 с.

7. Водохранилища мира. (отв. ред. Г.В. Воропаев, С.Л. Вендров). М.: Наука, 1979. 287 с.

8. Временные методические рекомендации к изучению санитарных условий водопользования и жизни населения при территориальном перераспределении стока рек. МЗ СССР, 1978, №1902-78/121-дт/193-41,

9. Гамзатов Г.Г. Социально-экологические последствия изменений природной среды на Дагестанском побережье Каспийского моря / Сб. рефератов междунар. конф. «Каспий-95». М.: Ингеоцентр, 1995. С. 65–69.

10. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М.: Научный мир, 2010. 232 с.

11. Зекцер И.С., Эльпинер Л.И. Ресурсный потенциал подземных вод в проблеме полноценного и безопасного для здоровья населения хозяйственно-питьевого водоснабжения // Водоснабжение и канализация. №5–6, 2016. С. 7–14.

12. Конвенция ЕЭК ООН По охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер» (1993) года / Бюллетень международных договоров, Охрана окружающей среды. Межд. правовые акты. Справочник. №10. СПб, 1994. 116 с.

13. Медико-экологические проблемы Аральского кризиса / Под ред. В.П. Сергеева, С.А. Беэра, Л.И. Эльпинера. М.: ВИНТИ, 1993. 101 с.

14. Новиков Ю.В., Спиридонов А.М., Куценко Г.И., Сайфутдинов М. М., Сергеева Н.М. Особенности водопользования и охрана здоровья населения в районах каскадного регулирования стока реки Волги. Медгиз, 2000, 144 с.

15. Онищенко Г.Г. Угрозы здоровью человека: гигиенические проблемы и пути их решения / Материалы Пленума межведомственного совета по экологии человека и гигиене окружающей среды Российской Федерации. М. НИИЧЕГОС, 2002, С. 3–9.

16. Пинигин М.А., Черепов Е.М., Эльпинер Л.И. Принципы гигиенического районирования бассейнов рек // Матер. Межд. Конгр. «Вода: экология и технология». М.: Сибико Интернэшнл, 1998. С. 632–633.

17. Позняков А. Интервью с В.И. Даниловым-Данильяном. Сколько стоил бы поворот сибирских рек? Интернет ресурс – [http://www. http://archive.is/15vyH](http://www.archive.is/15vyH)

18. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду Р 2.1.10.1920-04. М.: МЗ РФ, 2004.

19. Руководство по прогнозированию медико-биологических последствий гидротехнического строительства. (отв. ред. Л.И. Эльпинер, С.А. Беэр). М., Научный совет по проблемам биосферы АН СССР, Институт водных проблем АН СССР, 1990. 172 с.

20. Эльпинер Л.И., Бокина А.И., Шафиров Ю.Б. Гигиеническая оценка воды опреснённой эвапорацией // Гигиена и санитария. №6, 1969. С. 22–25.

21. Эльпинер Л.И., Васильев В.С. Проблемы питьевого водоснабжения в США. М.: Наука, 1983. 168 с.

22. Эльпинер Л.И. О влиянии водного фактора на состояние здоровья населения России // Водные ресурсы. Т. 22, №4, 1995. С. 418–25.

23. Эльпинер Л.И. Некоторые теоретические положения к изучению медико-экологических аспектов в условиях проектируемого территориального перераспределения водных ресурсов // Сб. научных трудов Моск. НИИГ им. Ф.Ф. Эрисмана. «Санитарные условия водопользования и здоровье населения в связи с перераспределением речного стока». М., 1985. С. 14–18.

24. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты изучения роли водного фактора в среде обитания человека // Водные ресурсы. №5, 1989. С. 41–48

25. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты Аральской катастрофы // Известия АН СССР. Сер. географ. №4, 1991. С.103–112.

26. Эльпине Л.И., Чупис А.В., Панасовский Ю.В. Социально-экологические вопросы использования водных ресурсов. М.: Наука, 1992., 135 с.

27. Эльпинер Л.И. Влияние гидрологической обстановки на санитарные условия жизни и состояние здоровья населения / Региональные проблемы здоровья населения. М.: Медгиз, 1993. С. 50–56.

28. Эльпинер Л.И., Зеегофер Ю.О., Вакар Н.Г. Геоэкологические и медико-экологические проблемы использования подземных вод (на территориях мега- и технополисов) // Инженерная экология. №3, 1998. С. 21–30.

29. Эльпинер Л.И. Междисциплинарный подход к решению водных проблем // Материалы III Международного конгресса «Вода: экология и технология» М.: Сибико Интернэшнл, 1998. С. 138–143.

30. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты Каспийской проблемы // Аридные экосистемы. №3, 1998. С. 22–27.

31. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты проблемы управления трансграничными водными ресурсами // Материалы второй международной конференции «Управление трансграничными водными ресурсами». М.: МГУП, 2010. С. 151–156.

32. Эльпинер Л.И., Тарасов О.В. Санитарно-гигиенические вопросы проектирования Красногорского водоподъёмного гидроузла на р. Иртыш // Медиорапия и водное хозяйство. №1, 2011. С. 29–33.

33. Эльпинер Л.И. Медико-экологические подходы к интегральному управлению водными ресурсами // Гигиена и санитария. №5, 2012. С.12–17.

34. Эльпинер Л.И. Медико-экологические проблемы использования питьевых подземных вод // Зекцер И.С. Поземный сток и ресурсы пресных подземных вод. М.: Научный мир, 2012. С. 307–343.

35. Эльпинер Л.И., Шаповалов А.Е. Влияние качества потребляемой воды на здоровье детского населения Смоленской области // Вопросы

географии. Сб. 133. М.: Московский центр Русского географического общества, 2012. С. 146–156.

36. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты кризиса питьевого водоснабжения // Гигиена и санитария. №6, 2013. С. 38–44.

37. Эльпинер Л.И. Медицинская гидрогеология – сформировавшийся раздел науки о подземных водах / Материалы Пленума научного совета РФ по экологии человека и гигиене окружающей среды // Под ред. Ю.А. Рахманина. М.: МЗ РФ, Отд. мед. наук РАН, 2014. С. 481–485.

38. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты современной гидрогеологии // Вода: химия и экология. №01, 2016. С. 30–35.

39. Эльпинер Л.И. Оценка риска для здоровья в проблеме глобального потепления климата // Гигиена и санитария. №6, 2002. С. 42–45.

40. Эльпинер Л.И. Сценарий возможного влияния изменения гидрологической обстановки на медико-экологическую ситуацию (к проблеме глобальных гидроклиматических изменений) // Водные ресурсы. Т. 30, №4, 2003. С. 473–484.

41. Яковлев С.В., Эльпинер Л.И., Нечаев А.П., Мясникова Е.В., Максимов А.В., Кочарян А.Г. Принцип оценки источников загрязнения поверхностных водных объектов // Мелиорация и водное хозяйство. №1, 2001. С. 36–42.

42. Яншин А.Л. Экологические следствия начавшегося глобального потепления климата // Материалы Международного конгресса «Вода: экология и технология» М.: Сибико Интернешнел, 1994. С. 58–61.

43. Романенко В.Д., Оксюк О.П. и др. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты // Отв. ред. Ю.П. Зайцев. Киев: Наукова думка, 1990.

256 с.

44. Elpiner L.I. Dynamics of development of medico-ecological situation of arid zones of ecological crisis. (Analysis of causes, problems meaning situation) / in monogr Environmental problems and sustainable development in the Aral Sea basin. (Ed. by Glantz M.H.). UK. Cambridge. University Press, 1999. P. 128–156.

45. Medical and ecological significance of the water factor / In monogr. Geology and Ecosystems., Springer USA, 2005. P. 219–228.

46. Elpiner L. Groundwater Use and Public Health. / in monogr. I.S. Zektser Groundwater and the environment. Lewis Publishers, USA, 2000. P. 125–146

47. Krasovsky G, Gheldakova Z., Elpiner L and as. / Hygienic criteria of drinking water quality (ed. by G. Krassovsky). M. UNEP, WHO, 1986. 315 p.

Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод

Е.В. Веницианов, М.А. Чиганова, Г.В. Аджиенко

Современное состояние качества поверхностных вод, по данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды в Российской Федерации (опубликованы доклады до 2015 г. вкл.) является стабильным, однако характеризуется рядом проблем.

По критериям, принятым в развитых странах, состояние водного хозяйства РФ следует характеризовать как кризисное. Услугами централизованного водоснабжения в РФ пользуются около 109 млн человек, или до 75% общей численности населения страны. В крупных и средних городах услугами централизованного водоснабжения пользуется почти всё население, в малых городах, посёлках городского типа и сельских населённых пунктах этот показатель не превышает 60%. По уровню доступа населения к системам централизованного водоснабжения РФ уступает развитым странам, в которых этот показатель составляет 90–95% и более. Из общего объёма воды, подаваемой в централизованные системы коммунального водоснабжения, через системы водоподготовки пропускается не более 59%, в сельских населённых пунктах этот показатель не превышает 20%. Около 27% водозаборов из поверхностных источников водоснабжения не имеют необходимого комплекса очистных сооружений, в том числе 16% – не оснащены обеззараживающими установками. Каждый второй житель РФ вынужден использовать для питьевых целей воду, не соответствующую по ряду показателей установленным нормативам [1].

Основная проблема – плохое состояние качества воды в большинстве используемых водных объектов, недостаточны системы водоохраных мероприятий. Отсутствует достаточно полная и объективная оценка состояния экосистем водных объектов в РФ, основанная на данных государственного и других видах мониторинга.

Одну из основных задач Водной стратегии РФ до 2020 г.: охрана и восстановление водных объектов до состояния, обеспечивающего экологически благоприятные условия жизни населения, – нельзя считать выполненной.

Основные системные проблемы, которые будут более подробно рассмотрены далее:

- Несовершенство и противоречивость системы водохозяйственного регулирования;
- Отсутствие системного подхода к внедрению изменений в системе регулирования (НДВ, НДС, переход на НДТ);
- Несовершенство системы мониторинга качества, в том числе отсутствие учёта опасных загрязняющих веществ;
- Практическое отсутствие риск-ориентированного подхода при оценке ущербов для биоты и человека;
- Недостатки научно-методической базы управления качеством вод;
- Недостаточность финансирования целевых программ.
- Эти недостатки в конечном счёте реализуются в плохом состоянии системы управления качеством.

Основные проблемы оценки качества вод. Научно-методическая база оценки и управления качеством природных вод в РФ устарела. Она построена на представлениях середины 20 в. Это ориентация на системы ПДК и интегральные индексы. В ней мало внимания уделяется физико-химическим и гидробиологическим процессам формирования качества, взаимодействию компонентов водного объекта – водной массы, донных осадков (отложений), прибрежной зоны, биоты. Особенно тревожное положение в оценке роли источников поступления в водные объекты отходов антропогенной деятельности: статистика сбросов предприятиями загрязняющих веществ (форма 2ТП водхоз) не достоверна, перечень контролируемых компонентов устарел, отсутствуют методики оценки неконтролируемого (в т.ч. диффузного) стока и вторичных загрязнений от донных осадков. Характерно неудовлетворительное состояние водоохраных зон практически во всех индустриально развитых регионах страны [2]. Устарела методическая и приборная база мониторинга качества вод. Не проводится мониторинг микрозагрязнений, прежде всего ксенобиотиков, хотя в развитых странах эти наблюдения проводятся уже 15 лет. Отсутствует методическая база оценки вредного влияния ксенобиотиков на экологическое состояние водных объектов и организм человека. Отсутствует мониторинг донных отложений, необходимый прежде всего для водоёмов и водохранилищ.

В значительной степени такая ситуация, угрожающая безопасности государства, обусловлена общеэкономическими причинами.

В экономике, переживающей нелёгкие времена, трудно найти инвестиции для развития и даже для поддержания (т.е. хотя бы для реновации физически изношенного оборудования) инфраструктуры, в том числе и такой отрасли, как водное хозяйство. Существует положительная обратная связь между низким уровнем инвестиций и приростом капитала: чем ниже уровень капиталобеспеченности отрасли, тем меньше инвестиций, и наоборот. В пущенной на самотёк экономической системе почти без исключений действует правило: богатые богатеют, бедные – беднеют (хотя бы по относительным показателям). Это правило относится и к отраслям народного хозяйства. Поэтому отрасль обороны будет богатеть, а отрасль водоохраны беднеть. Государственное управление обязано противостоять подобной тенденции. Этому требуют интересы страны. Рассмотрим некоторые, наиболее существенные изъяны системы управления водным хозяйством.

Два подхода к природоохранному регулированию. В РФ принят подход на основании нормирования воздействия с использованием предельно допустимых концентраций (ПДК), в мировой практике получивший название опасность-ориентированного подхода, или концепции «нулевого» риска. Критерием допустимости загрязнения является выполнение неравенства $C < \text{ПДК}$, где C – концентрация загрязняющего вещества в так называемом контрольном створе. В природоохранительном законодательстве развитых стран, в частности в Европейском Союзе, уже более 20 лет происходит планомерный переход к риск-ориентированному подходу [3]. Для каждого из загрязняющих веществ на основании информации о его свойствах определяются вероятность воздействия на живые организмы и возможные негативные эффекты такого воздействия, его трансформациях в водном объекте, состоянии самого водного объекта. Уровень допустимого риска учитывает экономическое состояние предприятий с использованием принципа НДТ – наилучших доступных технологий. Только на основании результатов оценки рисков принимается решение о способах водоохраны, а также о размере платежей за загрязнение.

В настоящее время в РФ существуют две основные системы нормативов качества природных поверхностных вод – при водохозяйственном (ПДКв) и рыбохозяйственном (ПДКвр) использовании вод-

ных объектов. Каждая из этих систем устанавливает единый норматив для всех водных объектов страны, несмотря на огромное различие физико-географических, климатических и социально-экономических условий. При этом рыбохозяйственные нормативы более жёсткие, чем водохозяйственные для большинства контролируемых загрязняющих веществ. На практике именно рыбохозяйственные нормативы используются как основные нормативы качества. Начиная с Постановления Совмина СССР №1045 от 15 сентября 1958 г. «О воспроизводстве и об охране рыбных запасов во внутренних водоёмах СССР» без каких-либо ограничений и исключений все водные объекты рассматриваются как рыбохозяйственные.

Проблема не только в том, чтобы стандарты и нормативы были научно обоснованы, они должны соответствовать возможностям экономики, которая в экологическом аспекте всё ещё живёт за счёт будущих поколений. Что касается современного бизнес-сообщества РФ, то оно ни технологически, ни экономически не готово к выполнению действующих высоких стандартов.

Установление технологически недостижимых, экономически неоправданных и экологически необоснованно жёстких нормативов приводит, вопреки намерениям законодателей, не к улучшению экологической ситуации, а к её ухудшению. Любой хозяйствующий субъект, чтобы обеспечить рентабельность своего производства, может выделить лишь ограниченный ресурс на очистку сточных вод, реализацию водоохраных мероприятий и т.п. Если для выполнения установленных нормативов требуются затраты, превышающие этот ресурс, водопользователь вынужден решать свои проблемы вне рамок правового поля, не заботясь о поэтапном проведении непосильных для него водоохраных мероприятий. Более того, такой способ «решения» проблем взаимодействия с государственными органами начинает интересовать и тех, кому целесообразные меры вполне по силам. Выход за рамки правового поля, конечно, юридически недопустим, но он экономически целесообразен. По некоторым оценкам, стоимость такого решения проблем водоохраны порядка десятков млрд руб. в год, что сопоставимо с объёмом средств, легально выделяемых на водоохраные цели.

Критика распространения рыбохозяйственных нормативов на все водные объекты страны не означает каких-либо претензий к

самому рыбному хозяйству как водопользователю. Рыбное хозяйство (рыболовство и рыбоводство) – один из важнейших видов хозяйственного использования водных объектов, обоснованно предъявляющий наиболее жёсткие требования к качеству воды. Оно испытывает немалые трудности из-за того, что до сих пор не сформулированы чёткие условия определения статуса водного объекта (или его участка) как рыбохозяйственного и критерии его зонирования для участков нереста, нагула, промысла. При этом должен учитываться видовой состав рыбной фауны, с выделением объектов, где обитают ценные виды.

Другим примером непродуманных нормативных требований является Приказ МПР РФ №333 от 17 декабря 2007 г. «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей». В п. 8 Методики указано: для сброса сточных вод в черте населённого пункта норматив допустимого сброса (НДС) определяется, исходя из отнесения нормативных требований к составу и свойствам воды водного объекта к самим сточным водам. Однако понятие «черта» (граница) населённого пункта по-разному определяется в различных законах, имеющих отношение к рассматриваемому аспекту проблемы (Земельный кодекс РФ, Градостроительный кодекс РФ и ФЗ-131 «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации»), и до сих пор не разъяснено, какому из них надлежит следовать при выполнении этого приказа.

Согласно указанным нормативно-методическим документам, качество сточных вод должно быть значительно лучше, чем воды питьевого назначения. Более того, нормативы по алюминию, свинцу, цинку, меди даже более жёсткие, чем требования ГОСТ 6709-72 Вода дистиллированная.

Управление качеством воды в водных объектах Требования к качеству отводимой воды должны учитывать фоновые концентрации, которые различаются для водных объектов, расположенных в разных физико-географических и климатических зонах, а в отдельных случаях необходимо принимать во внимание и локальные особенности водных объектов.

Актуальной проблемой для РФ является переход на принцип нормирования в соответствии с наилучшими доступными техноло-

гиями (НДТ) по отраслям промышленности и ЖКХ. Сделан первый шаг: разработаны Информационно-технологические справочники по НДТ некоторых отраслей. Однако до сих пор отсутствует процедура перехода от действующей системы регулирования сбросов на основе НДС к системе, основанной на НДТ. Мы рискуем повторить печальный опыт с нормативами допустимых воздействий (НДВ), которые были разработаны при затратах в сотни миллионов рублей для бассейнов всех крупных рек и, однако, так и не включены в систему регулирования сбросов сточных вод.

Значительная часть загрязняющих веществ аккумулируется в донных отложениях. Следует иметь в виду, что водохранилища, созданные на многих равнинных российских реках – это огромные отстойники. Научные исследования последних лет показали, что объём и химический состав этих отложений в настоящее время таковы, что вероятность выхода вторичных загрязнений высока. Однако у нас отсутствуют какие-либо нормативы содержания загрязняющих веществ в донных осадках. Фактически отсутствует мониторинг донных отложений, хотя Водный кодекс РФ предписывает ведение «мониторинга состояния дна и берегов водных объектов, а также состояния водоохраных зон» (пункт 5.2 части 4 статьи 30).

Публикуемые данные не дают полной картины об источниках загрязнения водных объектов, так как содержат лишь качественные по сути характеристики сточных вод: загрязнённые, очищенные и пр. Форма отчётности 2ТП Водхоз составляется самими предприятиями, и достоверность такой исходной информации сомнительна. К тому же эти данные характеризуют лишь часть источников загрязнения. Диффузные неконтролируемые источники для ряда водных объектов превышают объём загрязнений от контролируемых точечных источников [4]. В условиях недостатка информации о реальном состоянии охраняемых водных объектов появляются весьма спорные документы, например Распоряжение Правительства РФ от 8 июля 2015 г. №1316-р «Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды». Не пояснен термин «меры государственного регулирования». Но более важен другой вопрос: в этом Распоряжении приведён список из 140 веществ и 17 стойких органических веществ в воде водных объектов, но количество ПДКв

и ПДКвр значительно больше, и их списки пополняются. Как быть, если загрязняющее вещество найдено в концентрации, превышающей ПДК, но не входит в Перечень указанного Распоряжения Правительства? И наоборот: концентрация меньше ПДК, но вещество входит в этот Перечень – надо ли к нему применять «меры государственного регулирования», и если надо, то какие?

Наконец, номенклатура поллютантов (ни в каких документах) не включает большие группы загрязняющих веществ, называемых ксенобиотиками. В частности, это лекарства, химические бытовые и промышленные средства и др., обладающие высокой биологической активностью. В развитых странах загрязнению ксенобиотиками уделяется большое внимание. Несмотря на относительно низкие концентрации, их воздействие на обитателей водных объектов и человека через потребляемую питьевую воду весьма значительно. Это особенно существенно для рек – источников питьевого водоснабжения, так как типовые системы водоочистки не ориентированы на удаление этих веществ.

Одним из актуальных вопросов в области охраны и рационального использования водных объектов является выделение из всего множества водных объектов тех, которые подлежат охране и на которые распространяются действующие нормативно-методические документы в области охраны вод. Забота об использовании ресурсов и сохранении водного объекта должна зависеть от того, в каком качестве он фигурирует в государственном учёте поверхностных и подземных вод, т.е. в государственном водном кадастре (статья 79 Водного кодекса РФ). Однако такой градации «водный объект» вообще и «охраняемый водный объект» в нём не предусмотрена. «Охраняемый водный объект» должен представлять интерес для водного хозяйства, экономики территорий и техногенные воздействия способны ухудшить его потребительские свойства. Одним из видов водопользования является эксплуатация водотока как коллектора транспортировки сточных вод. Следует разработать критерии допустимости такого вида водопользования. Например, река Пехорка на 90% состоит из сточных вод Люберецких очистных сооружений, однако рассматривается как рыбохозяйственный объект.

Проблемы экономического обеспечения управления водопользованием. Ключевая проблема российского водного хозяйства –

оторванность его экономического механизма от реальных потребностей управления водопользованием, прежде всего – водоохраны. В Государственном докладе «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2015 году» сообщается, что в условно сопоставимых ценах текущие затраты на охрану и рациональное использование водных ресурсов в 2015 г. по сравнению с 2005 г. составили 85–86%.

За последние 5 лет имеет место уменьшение суммарного поступления водного налога и платежей за водопользование в номинальном исчислении. В реальном исчислении с поправками на инфляцию сумма поступлений от водного налога и платежей за негативное воздействие на водные объекты (оценённая по своего рода «покупательной» способности рубля) к 2016 г. за 10 лет уменьшилась в четыре раза. Капиталовложения в водоохрану и рациональное использование водных ресурсов из всех источников финансирования за последние 10 лет находились на уровне 25–30 млрд руб. в сопоставимых ценах, т.е. фактически не росли.

По оценке специалистов, готовящих новый вариант Стратегии развития водного хозяйства РФ (на этот раз до 2030 г.), по сценарию неухудшения состояния водных ресурсов требуется ежегодно сумма порядка 45 млрд руб., а для улучшения состояния – более 70 млрд руб. Очевидно, что для осуществления подобных предположений требуется резко увеличить либо бюджетную поддержку водоохраных мероприятий, либо в несколько раз повысить ставки водного налога. Радикальное изменение ситуации с финансированием водного хозяйства имеет ключевое значение для экологического благополучия водных ресурсов РФ и, в конечном счёте, для здоровья населения.

Следует также отметить незначительную роль разработанных во всех бассейнах в соответствии с Водным кодексом РФ Схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО), которые должны были, в частности, обеспечить экологически и экономически обоснованные программы мероприятий по улучшению состояния водных ресурсов.

Концепция СКИОВО, разработанная ещё в 1980-е гг., безнадежно устарела. В большинстве стран влияние сбросов сточных вод предприятий (как действующих, так и проектируемых) оценивается с

использованием математических моделей. Заметим, что в США для расчёта TotalMaximumDailyLoad (TMDL) – нормативного показателя (аналога НДС и НДСВ), устанавливающего общую максимальную суточную нагрузку на участок водного объекта или объект в целом, используются сертифицированные программные комплексы, ориентированные на индивидуальный подход для каждого водного объекта и каждого водопользователя [5]. В РФ до сих пор используются расчётные методы начала 1950-х гг.

Вместо пухлых томов СКИОВО во всех водохозяйственных организациях должны появиться компьютерные информационно-вычислительные системы, оснащённые моделями «подведомственных» бассейнов и их участков. Это будет намного эффективнее и дешевле, чем неработающие СКИОВО. Конечно, переход к использованию информационно-вычислительных систем как основному инструментальному средству в управлении водным хозяйством и водными ресурсами потребует радикальных изменений в подготовке кадров для отрасли.

В заключение подчеркнём, что часто повторяемый тезис о водном богатстве РФ, будучи справедливым «в общем и целом», не должен заслонять серьёзные проблемы водохозяйственной отрасли.

Современные подходы определения и оценки опасности органических ксенобиотиков при анализе качества вод.

При оценке качества вод большой сложностью отличается определение и идентификация органических ксенобиотиков, которые представляют собой самые разнообразные классы химических соединений, что приводит к необходимости специфической пробоподготовки при анализе. В воде помимо антропогенных органических соединений содержится огромное количество природных – это продукты метаболизма водных организмов, вещества, образовавшиеся вследствие разложения высшей водной растительности, разнообразные осколки гуминовых кислот и т.д. В водных пробах обнаруживаются соли, кислоты, альдегиды, т.е. практически все классы химических соединений.

В настоящее время существует огромное количество органических соединений, для каждого из которых просто невозможно или даже не нужно разрабатывать и утверждать методики идентификации и определения. В этом случае наиболее общими являются

методы тотального определения (скрининга), которые позволяют определять весь спектр соединений, ограниченный только чувствительностью прибора и его разрешением. Такие методы, как правило, уступают по чувствительности и разрешению методам, ориентированным на индивидуальное вещество или их определённый класс.

Исходя из того, что с точки зрения аналитики вода – сложная смесь веществ, в том числе органических ксенобиотиков – возможны различные направления их поиска, а именно: 1) поиск конкретных веществ; 2) поиск по химическим классам; 3) поиск по классам функциональных назначений веществ; 4) поиск по профилю источника загрязнения; 5) поиск особо опасных веществ; 6) тотальный скрининг; 7) поиск по другим принципам. Отметим, что различные направления поиска частично перекрываются.

Отметим, что на реальные проявления опасного действия конкретного ксенобиотика могут оказывать влияние другие вещества, находящиеся в воде. Очевидно, что такое влияние может характеризоваться суммацией, антагонизмом или потенцированием [6]. Поэтому, на наш взгляд, даже при осуществлении идентификации индивидуальных соединений по специальным методикам тотальный скрининг является обязательным.

Согласно «Правилам охраны поверхностных вод» (утв. Госкомприроды СССР 21 февраля 1991 г.), запрещается сбрасывать в водные объекты возвратные (сточные) воды, содержащие вещества или продукты трансформации веществ в воде, для которых не установлены ПДК или ОДУ, а также вещества, для которых отсутствуют методы аналитического контроля, за исключением тех веществ, что содержатся в воде водного объекта. Однако реально это положение не соблюдается, в воду могут попадать соединения, для которых отсутствуют нормированные значения ПДК. Кроме того, соединения в воде подвергаются всевозможной физико-химической и метаболической трансформации, в результате которой могут образовываться вещества, зачастую более опасные, чем исходные, причём для этих вторичных продуктов значение ПДК отсутствует в подавляющем большинстве случаев.

Таким образом, анализ качества природных вод, особенно тех, которые используются как источники питьевого водоснабжения,

требует понимания многокомпонентности загрязнения, представления о потенциальном наличии синергизма и о необходимости идентифицировать вещества, для которых нет формализованных и нормативных методик.

Из анализа литературы следует, что хроматография и хромато-масс-спектрометрия в настоящее время являются самыми распространёнными и наиболее часто используемыми методами химического анализа для идентификации органических соединений. Ни один аналитический метод не может конкурировать с хроматографией и масс-спектрометрией по универсальности применения и эффективности разделения самых сложных многокомпонентных смесей. Используя хроматографию, можно определить содержание супертоксикантов, в частности полихлорированных диоксинов в объектах окружающей среды при крайне низких концентрациях этих веществ.

К этому же утверждению приводит и анализ наукометрического исследования. В табл. 1 приведены сведения по числу докладов на Питтсбургской конференции по аналитической химии и прикладной спектроскопии (PITTCON 2016), которая является наиболее представительной в мире по разным методам анализа [по числу участников (14 000–20 000), подготовленных докладов (около 2000), а также фирм – производителей оборудования (около 1000) на выставке, проходившей в рамках конференции]. Интерес к хроматографии очень большой: сегодня около 60% химических анализов во всех странах мира выполняются хроматографическими методами [7]. Среди хроматографических методов высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) опережает метод газовой хроматографии; интенсивно развивается сверхвысокоэффективная жидкостная хроматография. Продолжается рост интереса к сверхкритической флюидной хроматографии (СФХ). Главная причина успеха – совершенная аппаратура, выпускаемая для СФХ. Есть работы, в которых сочетаются методы сверхкритической экстракции (СФЭ) и СФХ (СФЭ+СФХ).

Обзор методов и технических средств обнаружения органических соединений [8] позволяет утверждать, что в принципе возможна идентификация любых органических ксенобиотиков, находящихся в воде, в концентрациях 10–9 г/дм³, а в ряде случаев до 10–12 г/дм³ при соответствующей пробоподготовке и выборе опти-

Современные методы анализа (по материалам PITTCON 2016) [7]

Методы	Число докладов
Хроматография (в том числе хроматомасс-спектрометрия – 146)	378
Спектроскопия (все методы)	194
Электрохимия	131
Масс-спектрометрия (без хроматографии)	116
Сенсоры (все типы)	92
Капиллярный электрофорез	37
Микроскопия	22
Химический анализ	11

Методы хроматографии	Число докладов
ВЭЖХ	79
Ультра-ВЭЖХ	21
ВЭЖХ-МС и ВЭЖХ-МС/МС	57
Гидрофильная	8
Ионная	8
Хиральная	6
Сверхкритическая флюидная	43
ГХ (из них ГХ-М и ГХ-МС-МС)	139 (81)
ГХ-ГХ	7
ГХ-ГХ-МС	11
Пиролизная	4
ГХ-ИКС	3

мального метода для идентификации и определения количественного содержания идентифицируемого соединения в воде. Идентификация соединений, находящихся в воде, позволяет не только формально определить их номенклатуру, а также брутто- и структурные формулы, но и на основе этих данных оценить вид их опасного действия, а в некоторых случаях и пределы опасных концентраций даже при отсутствии нормированных значений ПДК для них.

Для этого разумно использовать расчётные методы оценки вида токсичности вещества и его опасных концентраций, которые формируются на основе знаний структуры вещества и/или его физико-химических характеристик, а также на информационные техноло-

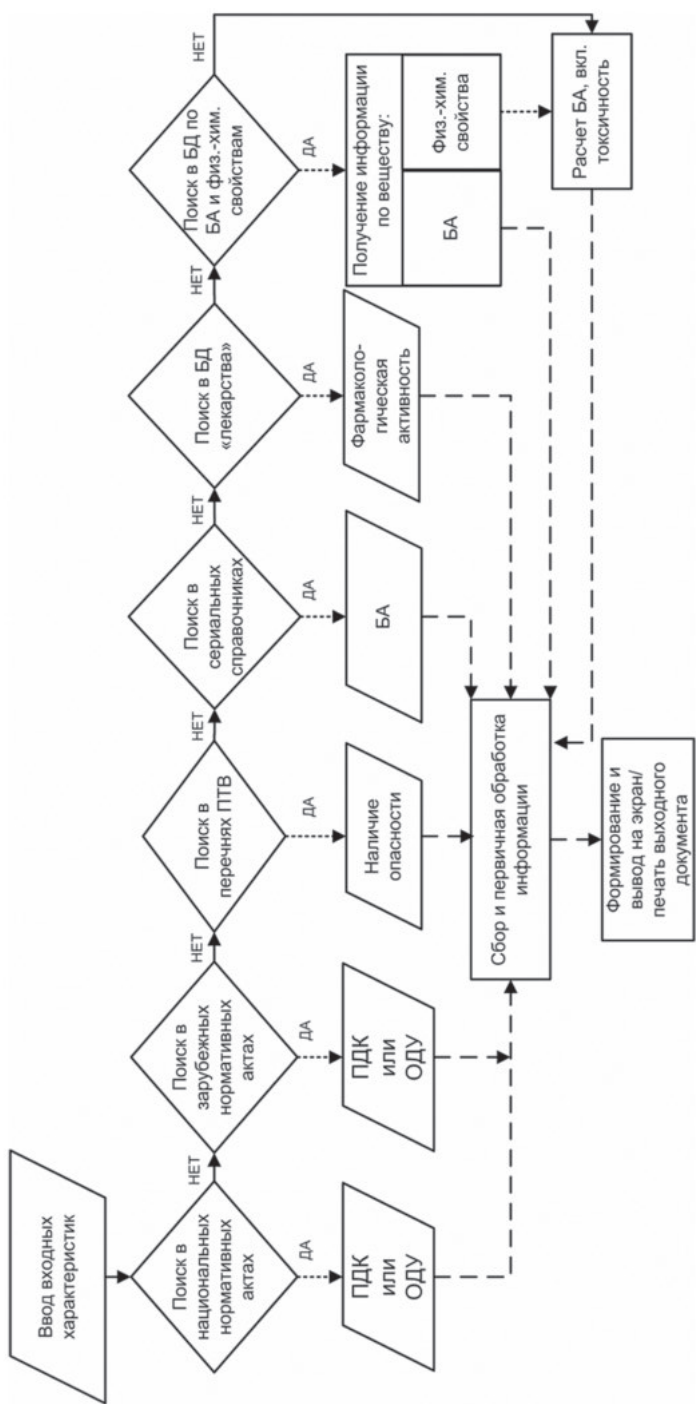


Рис. 1 Информационные технологии оценки ксенобиотического, включая лекарственное, загрязнения (под БД «лекарства» понимаются синонимическая БД (содержит химическую структуру, химическое название, синонимы и некоторые свойства, включая токсичность) и БД метаболитов). БА – биологическая активность, БД – базы данных, ОДУ – ориентировочно допустимый уровень, ПДК – предельно допустимая концентрация, ПТВ – приоритетно токсичные вещества

гии, связанные с поиском сведений об опасности веществ в международных базах данных и регистрах (рис. 1).

В разработанной системе используется 14 международных и национальных баз данных, среди которых 10 являются легитимными по отношению к РФ, и программа прогноза биологической активности соединений по их структуре (Prediction of activity spectra for substances – PASS) [9, 10].

Обучающая выборка в дескрипторном анализе по схожести содержит экспериментальные данные об активности входящих в неё соединений, включая фармакологические и токсические виды активности, с указанием мишени, концентрации и ряда других особенностей проявления этой активности. Поэтому для прогноза спектра биологической активности и, в частности, токсичности целесообразно использовать системы, основанные на применении обучающей выборки.

Современная версия компьютерной программы PASS 2014 прогнозирует 7157 активностей на основе данных о 959 801 соединений. Средняя точность предсказания, рассчитанная по методу исключения по одному, составляет 94,1% [9, 10]. Список прогнозируемых PASS видов биологической активности включает основные и побочные фармакологические эффекты, биохимические механизмы действия, специфическую токсичность, нежелательные мишени и эффекты, связанные с метаболизмом, транспортом и влиянием на экспрессию генов. Прогнозируемые виды биологической активности можно расклассифицировать по уровням действия: целостный организм, отдельные системы организма (например нервная), отдельные органы, ткани, клетки, субклеточные структуры, биохимические реакции или биомакромолекулы. Результатом прогноза в программе являются вероятности наличия и отсутствия конкретного вида активности.

Методы на основе обучающей выборки позволяют также прогнозировать и некоторые количественные характеристики токсичности. Например, по программе GUSAR можно провести расчёт следующих экотоксикологических показателей: фактора биоаккумуляции, LD50 (средняя смертельная концентрация для дафнии и гольяна), IGС50 (концентрация полумаксимального ингибирования роста) для инфузории тетрахимена пириформис, а также показате-



Рис. 2. Концепция риск-ориентированного подхода к законодательному регулированию

для острой токсичности LD50 для крыс (при разных способах введения в организм). Химическая структура вещества в GUSAR, как и в программе PASS, представлена дескрипторами, используемыми в программе PASS, и дескрипторами биологической активности, которые основаны на результатах прогнозирования в программе PASS [11].

Риск-ориентированный подход в законодательном регулировании качества вод. Риск-ориентированный подход к природоохранному регулированию в основе отличается от традиционного подхода, направленного на выявление и пресечение нарушений природоохранного законодательства субъектами хозяйственной деятельности, применение системы штрафов и привлечение к различным формам ответственности, а также ликвидацию последствий загрязнений ОС [12].

Оценка рисков является широко применимым подходом к решению природоохранных задач и представляет собой процедуру оценки опасностей, присущих тому или иному процессу или условию, в количественном или качественном выражении (рис. 2). Оценка экологических рисков может включать оценку рисков для здоровья человека, оценку токсикологических рисков, рисков, присущих определенной отрасли или связанных с конкретными типами предприятий, выявление предельных значений факторов, оказывающих воздействие на человека, биоту, экосистемы и др.

Риск-ориентированный подход к регулированию качества вод на законодательном уровне может быть реализован как составляющий механизм системы выдачи разрешений на осуществление хозяйственной деятельности, а также, как основа планирования и осуществления проверок соответствия законодательным требованиям (рис. 3).



Рис. 3. Место риск-ориентированного подхода в системе природоохранного регулирования

В Великобритании, Ирландии, Шотландии, Нидерландах, Португалии риск-ориентированный подход применяется при выдаче экологических разрешений на выбросы, сбросы сточных вод, использование подземных вод, обращение с отходами. Ответственными за реализацию риск-ориентированного подхода в этих странах являются органы исполнительной власти, в основном – Агентства по охране окружающей среды. Такие Агентства обычно проводят ряд универсальных оценок рисков, на основе которых разрабатываются стандартные правила для определённых видов деятельности. Такие правила включают потенциальные риски и способы управления ими. Так, в Великобритании универсальные оценки рисков проводят для ряда проектов, например, для стандартных установок биологической очистки сточных вод, установок по переработке отходов, обработке металлов, добыче полезных ископаемых и т.д. В случае, если природопользователь планирует деятельность, в отношении которой была проведена универсальная оценка рисков и разработаны стандартные правила, он не обязан проводить собственную оценку рисков для получения разрешения. В случае, если природопользователь планирует деятельность, не охваченную стандартными правилами, он должен проводить оценку рисков самостоятельно [13].

В рамках подхода к выдаче природоохранных разрешений Агентство по охране окружающей среды Великобритании подразделяет объекты лицензирования на три группы, согласно уровням негативного воздействия:

- Объекты первой группы осуществляют деятельность с низким уровнем воздействия на окружающую среду (например, транспортировка бытовых отходов или рыболовство). Требования к ним ограничиваются оплатой лицензии и прохождением редких проверок.
- Объекты второй группы функционируют в условиях стандартных разрешений и лицензий, к ним применима упрощенная Схема оценки производственных рисков (Operational Risk Appraisal Scheme, OPRA).
- Объекты третьей группы представляют собой наиболее сложные и опасные производственные объекты. Им выдаются индивидуальные разрешения, для них проводится полноценная оценка рисков по Схеме.

Необходимая степень регуляторного контроля определяется на основании текущего статуса соответствия компаний действующему законодательству (полное соответствие, преимущественное соответствие, преимущественное несоответствие, серьезно нарушающие закон). В этой связи важную роль играет оценка производственных рисков, приводящаяся в странах ЕС на основании методологии оценивающей пять групп риск-факторов:

- Сложность объекта воздействия: вероятность существенного воздействия на одну или несколько сред (воздух, почва, вода); использование одного или нескольких взаимосвязанных, но отдельных технических процессов; вероятность аварийного выброса/сброса; наличие потенциально опасных веществ; масштаб воздействия; необходимость существенного вовлечения регуляторных органов для оценки и поддержания соответствия законодательству и общественного доверия;
- Входные и выходные потоки: состав и объём поступлений загрязняющих веществ; среда, подверженная воздействию (воздух, вода, почвы); объём образования отходов; воздействие веществ на среду поступления.
- Местоположение: близость к территории проживания населения; близость к особо охраняемым и иным природным территориям;

чувствительность объектов приёма сбросов сточных вод; вероятность неочищенных сбросов в водную среду и наличие мер контроля; вероятность подтопления; расположение в границах зон, где качество атмосферного воздуха не соответствует целевым показателям.

- Система менеджмента предприятия и её результативность: наличие или отсутствие системы менеджмента, устанавливающей подходы к управлению негативным воздействием, обслуживания технического оборудования и др.; компетентность персонала и регулярность и полнота обучения, наличие процедур мониторинга, аудита и оценки; наличие планов действий в чрезвычайных ситуациях.
- Степень соответствия нормативно-правовым требованиям (с использованием схемы классификации соответствия законодательству). Субъекты хозяйственной деятельности заполняют опросник по каждому из объектов негативного воздействия, находящегося в собственности. История нарушений законодательства субъекта хозяйственной деятельности.

Группы рисков, присущих конкретному виду деятельности определяются на основании специальных справочных таблиц. Группы рисков ранжируются от А до Е, группа А требует минимального вмешательства регулирующих органов, Е – максимального. Каждая из групп связана с количественным уровнем риска. Совокупность уровней риска позволяет при помощи схемы оценки выявить итоговый уровень риска для конкретного предприятия и установить соответствующую величину платы предприятия и издержек регулирующего органа [14]

Подход к риск-ориентированному регулированию качества вод можно наглядно рассмотреть на примере Агентства по охране окружающей среды Ирландии, внедрившую риск-ориентированную систему в 2007 г. Агентство проводит лицензирование предприятий, осуществляющих приём и очистку сточных вод. Для этих целей разработан специальный инструмент – Методология динамической оценки рисков (DREAM), позволяющая определить характер и обратимость экосистемных изменений при заданных параметрах деятельности и негативного воздействия таких предприятий. Методология служит инструментом принятия решений в отношении

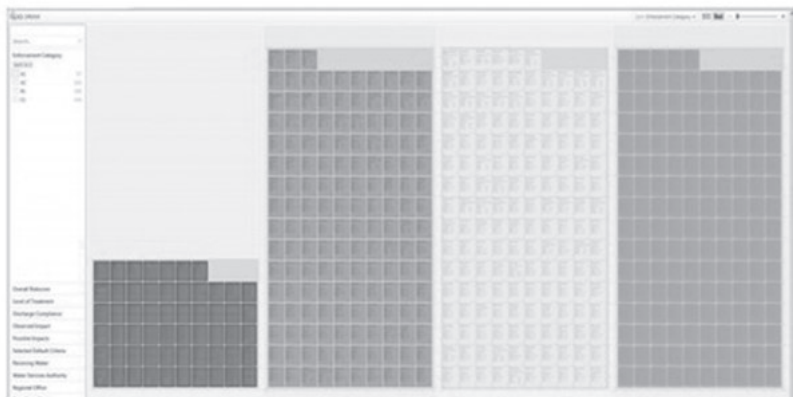


Рис. 4. Результаты оценки рисков в соответствии с методологией динамической оценки рисков DREAM

приоритетных очистных сооружений, выработке мер по достижению соответствия законодательству и улучшению качества вод. Как и в случае подхода к промышленным предприятиям, методология DREAM классифицирует риски по пяти группам: степень очистки, виды воздействия, потенциальные объекты воздействия, соответствие сбросов/выбросов требованиям законодательства, история нарушений законодательству.

Риск-ориентированная методология регулирования была разработана для фокусировки усилий исполнительных органов на объектах сбросов, обладающих значительным фактическим или потенциальным воздействием на окружающую среду. Потенциальное воздействие включает риски, связанные с близостью чувствительных зон, например, пляжей или источников питьевого водозабора. Данные о существующем воздействии собираются из баз данных системы мониторинга качества окружающей среды. Обновление данных системы приводит к соответствующему обновлению уровня рисков в динамическом режиме. Пример результирующей оценки риска приведён на рис. 4, где красным цветом обозначен самый высокий уровень риска, зелёным – самый низкий. Каждый квадрат обозначает группу риска с присвоенным баллом.

Оценка рисков от систем очистки сточных вод на предприятиях проводится в соответствии с Проектом вмешательства регулирующих органов, основанном на двух факторах: характеристиках под-



Рис. 5. Зоны риска, выявленные путем совмещения карт зонирования рисков и зонирования экологически чувствительных областей

контрольного предприятия и уровня риска отдельных видов деятельности. Характеристики подконтрольного предприятия зависят от их уровня мотивации руководства и соответствия законодательству. Виды предприятий или деятельности подразделяются на категории в зависимости от присущего им уровня риска, подходов к управлению рисками и стабильности риска, т.е. способности изменяться со временем. В отношении установок по очистке коммунально-бытовых сточных вод применяется схожая модель, но вторым фактором является экологическая чувствительность местоположения объекта. Путём совмещения карты присущих рисков и зонирования областей в зависимости от их экологической чувствительности и природоохранного значения выделяют восемь зон риска (рис. 5). Виды регуляторного вмешательства, определённые таким образом, формируют Национальный план Агентства, формируя три направления: 1) стратегию проведения осмотров и выдачи предписаний в соответствии с нормативными процедурами, 2) программы проверок и мониторинга, 3) систему вовлечения и стимулирования предприятий.

В целом риск-ориентированный подход может быть эффективной составляющей законодательного регулирования как механизм

принятия решений, способ сравнения рисков для определения метода реагирования, соответствующего уровню риска, а также как механизм определения областей в рамках сложных систем и процессов, где методы управления рисками будут наиболее эффективны. С другой стороны, объективно следует отметить, что и у риск-ориентированного подхода существует ряд недостатков. Оценка рисков сопряжена с рядом трудностей, в частности:

- недостатком информации – отсутствие первичных данных или неточность данных не позволяют сделать точный прогноз;
- неточностью измерений – недостаточность проведенных измерений, неадекватность методов измерений, ошибки измерений и т.д.;
- условиями измерений – различия между лабораторными и естественными условиями измерений ввиду особенностей климатических факторов среды, типа почвы, структуры экосистемы, различия в видовом составе;
- неточностью прогнозных моделей – недостаток знаний о механизмах, недоучет стресс-факторов, экстраполирование результатов за пределы измерений, нестабильность оценочных параметров.

Заключение

Рассмотрены существенные (системные) недостатки регулирования качества природных вод. Изложены современные подходы к анализу и идентификации ксенобиотиков, содержащихся в природных водах. Представлены современные подходы к риск-ориентированному подходу при регулировании качества природных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 г. №1235-р «Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года».
2. Гордин И.В. Кризис водоохраных зон России. М.: Физматлит, 2006. 196 с.
3. General Report 2015. European Chemicals Agency, Helsinki, March 2016
4. Кирпичникова Н.В. Исследование неконтролируемых источников загрязнения (на примере Ивановского водохранилища). Автореферат на соиск. к.т.н. 1991. 24 с.
5. Guidance for Water Quality-Based Decisions: The TMDL Process. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Washington, D.C. Doc. No. EPA 440/4-91-001. April 1991.

6. Жолдакова З.И., Рахманин Ю.А., Сеницына О.О. Комплексное действие веществ. Генетическая оценка и обоснование региональных нормативов. М.: НИИ ЭЧГОС им А.Н. Сысина, 2006. 234 с.

7. Яшин Я.И., Веденин А.Н., Яшин А.Я. 60 лет хроматографическому приборостроению // Аналитика. №2, 2016. С. 84–99.

8. Отто М. Современные методы аналитической химии. 3-е издание. М.: Техносфера, 2008. 544 с.

9. Filimonov D.A., Poroikov V.V. Probabilistic approach in activity prediction // Chemoinformatics Approaches to Virtual Screening. Cambridge (UK): RSC Publishing. 2008. P. 182–216.

10. Filimonov D.A., Lagunin A.A., Glorizova T.A., Rudik A.V., Druzhilovskii D.S., Pogodin P.V., Poroikov V.V. Prediction of the biological activity spectra of organic compounds using the pass online web resource // Chemistry of Heterocyclic Compounds. V. 50 (3), 2014. P. 444–457.

11. Lagunin A., Zakharov A., Filimonov D., Poroikov V. QSAR modelling of rat acute toxicity on the basis of PASS prediction /// Molecular informatics. V. 30, 2011. P. 241–250.

12. Dara L. A Strategic approach to risk based regulation by the EPA, Ireland, from: http://risksummit.eu/wp-content/uploads/2013/03/risk-based-regulation-by-the-epa-ireland_dara-lynott.pdf.

13. Standard rules: environmental permitting by Environment Agency UK, from: <https://www.gov.uk/government/collections/standard-rules-environmental-permitting>.

14. Risk and Regulatory Policy: Improving the Governance of Risk by OECD Reviews of Regulatory Reform, 2010, from: <http://regulatoryreform.com/wp-content/uploads/2015/02/oecd-risk-and-regulatory-policy-2010.pdf>.

Изучение и оценка гидрогенной динамики экосистем

Н.М. Новикова, Ж.В. Кузьмина

Проблема взаимодействия вод суши с окружающей средой и ее экологические аспекты – одна из актуальнейших современных научно-практических проблем, поскольку имеет непосредственный выход на условия жизни и деятельности человека, проблему водной и продовольственной безопасности страны. Важность и необходимость проведения исследований по гидрогенной динамике наземных экосистем и их место в цикле исследований водных проблем были обоснованы в своё время профессором В.С. Залетаевым [16], известным учёным-естествоиспытателем, основавшим в Институте водных проблем РАН лабораторию динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора. Залетаев справедливо считал [15], что гидрогенную динамику экосистем необходимо изучать в связи с тем, что, с одной стороны, – элементарная наземная экосистема обладает широким информационным спектром и способна быть индикатором механизмов воздействия водного фактора и трендов развития наземной среды, а с другой, – на что указывал и В.И. Вернадский [6], воды суши – результат функционирования биосферы и под влиянием современных изменений, происходящих в экосистемах, а затем и в биосфере в целом, неизбежна трансформация гидросферы нашей планеты.

Гидрогенная динамика наземных экосистем впервые, как проблема крупного масштаба, проявилась в середине 20 в. вследствие активного развития водного хозяйства в СССР: создания гидроузлов и водохранилищ при них, перевода обширных земельных массивов под орошаемое земледелие, что привело к трансформации природной среды в границах речных бассейнов и крупных регионов. К 1990-м гг. в Аральском регионе сток рек Амударья и Сырдарья почти полностью разбирался на орошение и перестал поступать в море. В итоге $\frac{2}{3}$ акватории Аральского моря обсохли, погибла солончатоводная экосистема. В отсутствии речного стока и поемного режима погибли тугайные экосистемы речных дельт и пойм на площади 2,5 млн га, а на землях, освоенных под орошение на площади 7,4 млн га природные экосистемы были превращены в агроценозы. Около 70% освоенных земель оказались засоленными. Трансформация при-

родной среды в этом регионе в 1990-е гг. была оценена как экологический кризис [4, 10, 91].

Водоохранилища – ключевые, базовые элементы гидротехнических и водохозяйственных систем любого ранга, поскольку именно они позволяют осуществлять регулирование водных ресурсов, преобразование гидросферы в желаемом для общества пространственно-временном направлении. С их помощью решались и решаются проблемы гидроэнергетики, сельского хозяйства, судоходства, промышленного и бытового водоснабжения, и др. По справедливому высказыванию известного исследователя водоохранилищ А.Б. Авакяна [1], водоохранилища – феномен 20 в. Именно в 1960-е гг. было создано их максимальное количество и в настоящее время в мире насчитывается более 30 тысяч крупных водоохранилищ объёмом более 1 млн м³, в том числе около 2,5 тысяч водоохранилищ более 100 млн м³ [18]. Количество же малых и средних водоохранилищ в сотни раз больше. Они – не только обычное явление на всех континентах (кроме Антарктиды), но и их роль достигла общепланетарного масштаба: объём вод суши за счёт воды, задержанной ими, увеличился приблизительно на 6,6 тыс. км³ [41], и, тем самым, произошла частичная компенсация естественного отрицательного водного баланса суши, составляющего около 610 км³/год [17]. При общей площади современного водного зеркала водоохранилищ на юге европейской части РФ в 400 тыс. км², изменения природной среды произошли на площади 700 тыс. км², а переустройство хозяйства – на территории в 1,5 млн км², что превышает площадь зеркала самих водоёмов в несколько раз [2]. По мнению К.К. Эдельштейна [79] создание водоохранилищ относится к крупнейшим мероприятиям, изменяющим природную среду в масштабе, соизмеримом с преобразованиями, внесенными урбанизацией, сельским хозяйством, гидромелиорацией и добычей полезных ископаемых.

Произошедшая трансформация природных экосистем на Арале и на Европейской части территории СССР определили необходимость контроля за экологическими последствиями трансформации вод суши и выдвинули в качестве первоочередных задачу проведения комплексных исследований по выявлению закономерностей динамики природных экосистем в условиях изменения водного режима крупных регионов.

Анализ изучения гидрогенной динамики наземных экосистем в зарубежных странах показал, что там исследования до сих пор не имеют комплексного характера, каждое явление и каждый вид водохозяйственного переустройства территории рассматривается индивидуально, вне связи друг с другом [54]. Так, отдельно рассматривается проблема спуска водохранилищ и зарастания обнажающегося дна [81, 93], проблем возвращения естественного режима спрямлённым участкам европейских рек [81] или рассмотрение процессов трансформации растительности в условиях заливания [88] и др. Т.е. за рубежом до сих пор не произошло осознание важности территориального анализа экологических последствий водохозяйственных преобразований природной среды и системного рассмотрения экологической роли водного фактора и его изменений в динамике наземных экосистем. Исследования экологических последствий изменения регионального климата также проводятся по отдельным видам водного хозяйства и проблемам.

Материалы и методы

Методология гидрогенного изучения динамики наземных экосистем была разработана в лаборатории динамики наземных экосистем ИВП РАН, исходя из теоретического обоснования исследований водных экологических проблем и предотвращения кризисных ситуаций [15, 16, 50, 22]. Было признано, что водный фактор обладает мощным средообразующим воздействием и является активным агентом их существования и трансформации. Под «водным фактором» понимаются основные составляющие вод суши: атмосферное увлажнение, поверхностные, подземные, почвенные воды. Эти составляющие нестабильны и их изменение может происходить как в силу природных причин, так и в результате деятельности человека. Экологическое значение имеют такие критерии, как: количество, качество вод и их пространственно-временное распределение.

Основным методическим подходом к выявлению причин и рассмотрению гидрогенной динамики наземных экосистем является анализ причинно-следственных экологических связей в системе: действующий фактор (природный или антропогенный) → трансформация водного фактора в результате совокупного действия климатического и какого-либо вида хозяйственной деятельности →



Рис. 1. Методический подход к выявлению причин динамики экосистем [50 с изменениями]

процессы изменения функционирования биоты из-за изменения водного фактора → формирование негативных явлений или экологических проблем (рис. 1).

В предложенном подходе учитываются природные и антропогенные факторы (агенты) и их совместное действие. Их наложение может приводить как к усилению совместного действия на экосистемы и агроценозы (если воздействия направлены в одну сторону), так и к ослаблению (если воздействия разнонаправленные). Экологические последствия для экосистем объединены в группы по условиям возникновения: климатические, богарные, ирригационные, водохранилищные и урбандшафтные. Каждая группа имеет свои особенности проявления, масштабы и значимость.

Современный гидроморфизм и его индикаторы. Хозяйственная деятельность человека и современные флуктуации климата [9, 20, 34, 36, 37, 38, 23, 24, 33] стали причиной широкомасштабного изменения водного режима территорий и, как следствие, гидрогенной трансформации структуры, функционирования и компонентного состава не только гидроморфных, но и автоморфных ландшафтов. Это явление гидрогенной трансформации ландшафтов получило название «неогидроморфизм» или «современный гидроморфизм» [43, 50, 45]. Развитие современного гидроморфизма приняло столь широкие масштабы, что некоторыми исследователями оценивается

как национальное бедствие для нашей страны «...поскольку засоление и деградация распространяются на многие миллионы гектар ценнейших черноземных и других плодородных почв» [14; с. 25]. К настоящему времени явлением переувлажнения и подтопления на юге России охвачено около 9 млн га, в том числе 5 млн га сельскохозяйственных угодий [11]. Для изучения и выявления развития в ландшафтах современного гидроморфизма была разработана система критериев и показателей (табл. 1).

Эта система была предложена для изучения развития гидроморфизма на побережьях водохранилищ [50, 51, 44] для установления глубины трансформации природных комплексов при разных видах воздействия водохранилища – затопления, подтопления. С этой целью среди критериев используются факторы (заливание и подтопление) и их показатели (критические значения). Среди биологических показателей используются компоненты экосистем (почвы, растительность, животное население). Некоторые из них (почвы) можно отнести к категории консервативных, их изменение происходит медленно и отражает тренды процессов трансформации водного фактора, в то время как растительность реагирует активно и непосредственно на флуктуационные изменения.

Методы оценки современного гидроморфизма и гидрогенных изменений в экосистемах. В последние годы (2012–17) для коллектива лаборатории основной задачей стала разработка оценочных диагностических показателей и критериев динамики экосистем для основных живых (растительных и животных), неживых (климатических, гидрологических) и условно живых (почвенных) её компонентов в условиях изменения водного режима территории при совокупном воздействии естественных и антропогенных гидрогенных факторов. В результате выполнения исследований и работе по Госконтракту с Министерством экологии и охраны окружающей среды РФ (2012–14) были определены и разработаны оценочные показатели и критерии как для живых так и для неживых компонентов экосистем.

Климатические изменения, влияющие на наземные экосистемы предлагается оценивать на основании динамического географического показателя – Относительного коэффициента изменений (ОКИ) основных климатических характеристик (ОКИ осадков и ОКИ тем-

пературы воздуха), который представляет собой отношение модуля изменения трендовых значений температуры (или осадков) за многолетний период (с момента открытия станции) к модулю амплитуды колебания фактических (измеренных) значений этого параметра в многолетнем аспекте [34, 36, 37]. При установлении наличия климатических изменений, способных повлиять на наземные экосистемы, совокупное воздействие изменений осадков и температуры воздуха (влажностно-температурного режима) предлагается оценивать по Индексу засушливости Педя 1 (ИПедя1) [58, 59, 34, 36, 37], который рассматривает аномалии температуры и осадков тренда по отношению к базовому периоду (1961–90 гг.) и его модифицированному варианту Педя 2 (ИПедя2) [34, 36, 37], который оценивает отклонение от среднего уровня средней температуры воздуха и суммы осадков за весь многолетний период наблюдений, с момента открытия станции.

Гидрологические (естественные) изменения под влиянием изменения климата, способные повлиять на наземные экосистемы также предлагается оценивать по Относительному коэффициенту изменений (ОКИ) основных гидрологических характеристик (ОКИ средних, ОКИ максимальных и ОКИ минимальных расходов и уровней воды в реках) за многолетний период, по такому же принципу расчёта как и для основных климатических характеристик [33, 34, 36, 37], т.е. – как отношение модуля изменения трендовых значений уровней и расходов воды за многолетний период к модулю амплитуды колебания фактических (измеренных) значений этих параметров в многолетнем аспекте. Гидротехнические (антропогенные) изменения предлагается оценивать по изменению (как правило, по сокращению) частоты и высоты заливания пойменных территорий в нижнем бьефе, а также по высоте и длительности подтопления территорий в верхнем бьефе [32; 38; 48, 44, 90, 92].

Оценка изменения почв экосистемы под воздействием водного режима территории (т.е. при совокупном воздействии естественных и антропогенных гидрогенных факторов) предлагается оценивать по степени и мощности оглеения (т.е. величине оглеенного горизонта в см и количества самих оглеенных горизонтов, а также по соотношению в % оглеения и ожелезнения по фону в оглеенных

горизонтах) и глубине залегания оглеенных горизонтов в почвах [21, 23, 24, 44, 52].

Нарушение экосистем предлагается разделять по типу и степени. На основании наличия или отсутствия климатических (естественных) изменений, а также гидрологических естественных или гидрологических антропогенных (гидротехнических) изменений и их совокупностей, можно выделять экосистемы разных типов нарушений: естественно нарушенные экосистемы (при естественных климатических и гидрологических нарушениях и их совместном влиянии), антропогенно нарушенные экосистемы (экосистемы нарушенные в результате гидротехнического антропогенного воздействия), смешанно нарушенные экосистемы (при совокупном воздействии естественных и антропогенных нарушений). Для каждого типа нарушения экосистем выделяются три степени нарушений: слабая, средняя, сильная [38].

Таблица 1

Индикаторы гидроморфизма: критерии и показатели [44, 52 с изменениями]

№	Критерии	Показатели
1	Изменение радиационного индекса сухости (по соотношению тепла и влаги М.И. Будыко [5])	тундра – 0,5, лесная зона – от 0,5 до 1, степная – от 1 до 2, полупустынная >2, пустынная >3
2	Изменение атмосферного увлажнения (по Г.Т. Селянинову [65]) ($ГТК=10P/\Sigma T$, где ΣT – сумма активных температур воздуха за период со средней суточной температурой выше $10^{\circ}C$, где P – осадки за тот же период, мм)	$ГТК>1$ – гумидное, $ГТК=1<0,5$ – субаридное, $ГТК<0,5$ – аридное
3	Заливание, длительность и частота	слабое – от 10 до 15 дней, не ежегодное, среднее – 16–40 дней, ежегодное, сильное – более 40 дней, ежегодное
4	Подтопление по глубине залегания ГВ	сильное – на глубине 0,3–1,0 м, умеренное – на глубине 1,1–2,4 м слабое – на глубине от 2,5 до 5,0 м
5	Уровень грунтовых вод, развитие гидроморфных процессов	гидроморфный режим – 0–1,5 м, полугидроморфный режим – 1,5 (3 м), автоморфный режим >3 м

№	Критерии	Показатели
6	Проявление в почвенном профиле	<ul style="list-style-type: none"> – повышенная мощность гумусового горизонта (А+В): для луговато- и луговых почв – более 130 см, для влажно-луговых – более 100 см; – признаки современных окислительно-восстановительных процессов в виде гидроокисных пленок железа (охристых пятен), сизоватости, включения марганцево-железистых новообразований: слабое проявление лугового процесса – от 1 до 2 м, активный луговой процесс (под гумусовым горизонтом) – от 50 до 80 см; – признаки глеевого процесса; – глубина наличия первичного и вторичного гипса (для степной зоны), который свидетельствует об уровне поднятия/опускания капиллярной каймы ГВ; – присутствие карбонатной плесени или размытых палевых пятен белоглазки (CaCO₃)
7	Изменение в растительности	<ul style="list-style-type: none"> – смена экологического типа растительности на основе представленности (% соотношения) видов разных экологических групп по отношению к водному фактору (гигрофиты, гидрофиты, мезофиты, ксерофиты), доминированию, типу водного питания (фреатофиты, трихогидрофиты, омброфиты) и засолению почв (мезофиты, мезогалофиты, галофиты); – доминирование или присутствие видов-индикаторов изменений водного режима (подтопления и затопления)
8	Изменение в населении животных	численность, плотность популяций индикаторных групп видов животных (рассчитывается для конкретных регионов)

Оценку нарушений от естественных (климатических) и антропогенных (гидротехнических) причин одной из основных живых компонент экосистем – растительности (являющейся эдификатором наземной экосистемы) предлагается проводить на основании совокупности биологических показателей [21, 40, 35].

Основные биологические показатели предлагается разделить на две совокупности – динамические и стабильные (табл. 2).

К динамической группе биологических показателей относятся показатели с постоянно изменяющимися (как минимум ежегодно) значениями. Они отражают направления и процессы в изменении увлажненности (обводненности) территории как от антропогенного, так и от естественного (климатического) воздействия. К динамиче-

Степени нарушений экосистем (долинных и пойменных) в результате изменения обводненности территорий при зарегулировании и/или климатических изменениях по основным биологическим критериям и показателям [40]

Степень нарушения экосистем → Эколого-биологические показатели↓	1. Нарушенное (естественное)	2. Слабо нарушенное	3. Средне нарушенное	4. Сильно нарушенное	5. Полная деградация
1. Стабильные, или постоянные биологические показатели, т.е. обычно изменяющиеся постепенно и индицирующие, в основном, региональные антропогенные (от ГС) нарушения					
а) изменение структурной организации растительных сообществ; по наличию и качеству изменений в ярусной структуре сообщества	5–6 ярусов (для леса) 3–4 яруса (для луга)	4 яруса (для леса) 2 (для луга)	3 (для леса) 2 (для луга)	2 (для леса) 1 (для луга)	1 (для леса) 1 (для луга)
б) наличие* и количественная** композиция в составе растительных сообществ видов растений – индикаторов изменения водного режима территории (по присутствию/отсутствию и общему количеству видов-индикаторов)	Полностью отсутствуют или встречаются единично до 2-х видов*	В составе сообщества 2 вида индикатора*	В составе сообщества 2–3 вида-индикатора*	В составе сообщества более 3-х видов индикаторов*	В составе сообщества только виды-индикаторы*
в) качественное и количественное проявление видов растений – индикаторов изменения водного режима территории (по обилию и проективному покрытию видов-индикаторов);	В малом обилии (sol-Un)**	В среднем обилии (sp-sp gr)**	В малом (один) и/или большом (другой) обилии**	В среднем и большом обилии (sp-sor3)**	В любом обилии**
	1–3 экземпляра вида-индикатора (с обилием Un)	Более 10 экземпляров вида-индикатора (с обилием sol-sp) и проективным покрытием вида до 20%	Образование не менее 10–15 микроочагов (куртин) вида диаметром 1–2 м с обилием sp gr-sor1	Полное слияние микроочагов и/или равномерное распространение вида по площади с обилием sp3-sor1	Полное доминирование вида (с обилием sor2-sor3), вплоть до образования монодоминантных сообществ

Степень нарушения экосистем → Эколого-биологические показатели↓	1. Ненарушенное (естественное)	2. Слабо нарушенное	3. Средне нарушенное	4. Сильно нарушенное	5. Полная деградация
г) изменение кормовой ценности луговых сообществ (по количественным показателям участия сорноотравя в составе сообщества)	Изменений нет (участие колочного сорноотравя до 3% от проективного покрытия)	Слабое ухудшение (участие колочного сорноотравя 3–7% от проективного покрытия)	Падение кормовой ценности на 20–50%	Сокращение продуктивности в 1,5–2 раза и кормовой ценности на 50–70%	Сокращение продуктивности в 3–4 раза; полное падение кормовой ценности
2. Динамические эколого-биологические показатели, изменяющиеся ежегодно и индицирующие процессы изменения увлажненности территории не только от регионального антропогенного воздействия (от ИС), но и от регионального естественного (климатического)	Изменений нет*	Изменения слабые, сокращение состава <5%*	Сокращение состава сообщества на 5–25%*	Сокращение состава сообщества в 1,5–1,9 раза*	Сокращение состава сообщества в 2–4 раза*
д) изменение видового разнообразия растительных сообществ, т.е. количественные* и качественные** измененные показатели общего видового разнообразия за многолетний период	Изменения виды другой экологической приуроченности в малом обилии (до 7% от состава)**	70–93% видов сообществ типичной приуроченности (7–30% и более видов иной – не характерного биотопа)**	50–70% видов сообщества типичной приуроченности (30–50% и более видов иной – не характерного биотопа)**	25–50% видов сообщества типичной приуроченности (от 51 до 74% и более видов иной – не характерной экологической приуроченности)**	До 25% видов сообщества типичной приуроченности (75% и более видов иной – не характерной экологической приуроченности)**
е) флуктуационная изменчивость растительных сообществ, т.е. соотношения количественных показателей: по присутствию постоянных видов растений от ежегодного* и многолетнего** (за 2–3 года) флористического спектра	Менее 70%*	Меньше или равно 70%*	Равно или более 70%*	Более 70% – менее 80%*	80–100%*
	Менее 50%**	Меньше или равно 50%**	Равно или более 50%**	Более 50% – менее 60%**	Более 60%**

ческим показателям относятся: 1) изменение видового разнообразия растительных сообществ за многолетний период и 2) их ежегодная флуктуационная изменчивость. К стабильной совокупности биологических показателей относятся показатели обычно изменяющиеся во времени не сразу, а за достаточно длительный период (от 10 лет и более) и обладающие более или менее постоянными значениями, изменяющимися не ежегодно. К стабильной группе биологических показателей относятся: 1) изменение структурной организации растительных сообществ (количество и качество ярусов); 2) наличие и количественная композиция в составе растительных сообществ видов растений – индикаторов изменения водного режима территории; 3) качественное и количественное проявление видов растений – индикаторов изменения водного режима территории; 4) изменение кормовой ценности луговых сообществ (по сорнотравью) [40, 35].

Таким образом, был разработан «Метод оценки нарушений в околоводных экосистемах по биологическим критериям и показателям при изменении обводнённости территорий (от естественных климатических и антропогенных гидротехнических воздействий)», который достоверно диагностирует изменения и нарушения в экосистемах.

Оценка нарушений одного из живых компонентов экосистем (наземных позвоночных) при изменении водного режима территорий под влиянием природных и антропогенных факторов предлагается проводить по разработанному оригинальному индексу «сравнительной оценки обобщённых показателей богатства животного населения (которое включает одновременную оценку видового разнообразия и численности)»: обобщённый индекс разнообразия и численности – $Ир = N \times P_{max} + S$, где N – количество видов, отмеченных в пределах биотопа; P_{max} – максимально возможное обилие вида (которое равно пяти); S – сумма балльных оценок обилия всех видов, отмеченных в пределах биотопа. Данный индекс ($Ир$) позволяет паритетно учитывать как видовое богатство, так и обилие каждого вида наземных позвоночных на различных территориях, подверженных изменениям в настоящее время или в перспективе. На основе распределения этого индекса для зоны влияния проектируемого гидроузла можно строить соответствующие карты [61, 62, 63, 13, 3].

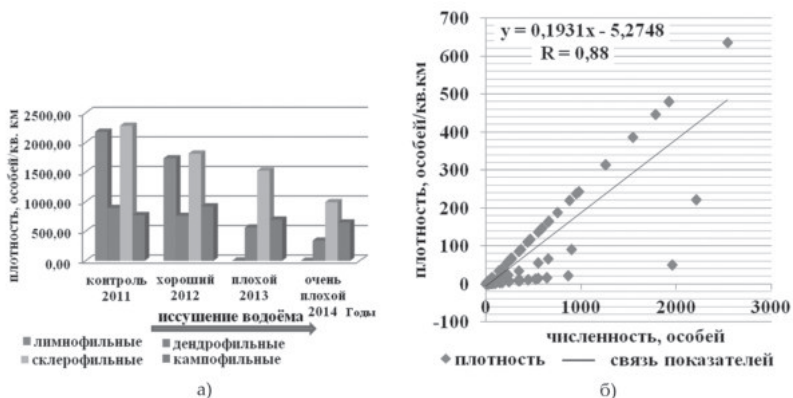


Рис. 2. Изменение плотности видов разных экологических групп а) и связь показателей численности и плотности видов б) птиц в орнитокомплексах.

Оценку нарушений другого живого компонента экосистем – орнитокомплексов – при изменении водного режима территорий под влиянием природных и антропогенных факторов предлагается проводить на основе показателей численности и плотности видов орнитокомплекса; показатель плотности видов в сообществе наилучшим образом способен отображать динамику состояния орнитокомплекса (рис. 2) [70, 71].

Основным оценочным индикационным показателем быстрой трансформации болотных экосистем торфяников при их обводнении и/или осушении является изменение структуры орнитокомплексов (на основе изменения состава и численности видов птиц), а оценочными критериями изменения этих экосистем служит их сравнительная качественно-количественная характеристика [12, 7]. Основными показателями и критериями длительнопротекающих трансформаций болотного комплекса в целом под влиянием антропогенных и природных факторов коллективом авторов, в составе которого участвуют и сотрудники ИВП РАН [69] определены: изменения соотношения пыли основных компонентов в спектрах споровопыльцевой диаграммы торфяного монолита, особенности видовой структуры раковинных амёб в торфяном монолите, степень содержания микрочастиц угля в торфяном монолите, реконструированные значения уровня залегания болотных вод (УБВ, см), а также степени гумификации торфа. В процесса трансформации берего-

вых экосистем основным оценочным показателем можно считать скорость разрушения берега – скорость продвижения бровки коренного берега [77, 78].

Были также разработаны методы, позволяющие на основании комплексной оценки нарушений нескольких компонентов экосистем оценить степень их трансформации в результате антропогенного – гидротехнического (по изменению в поверхностных и подземных водах, почвах и растительности [44, 52]) или суммарного – антропогенного и естественного (климатического) воздействия (по изменению основных климатических и гидрологических характеристик, почв, растительности [29, 31, 35]).

Результаты исследований и обсуждение

Интенсивная хозяйственная деятельность на фоне современных изменений климата в лесостепных и степных районах на юге РФ обусловила возникновение переувлажнения на обширных территориях, в связи с чем в лаборатории ведется изучение развития современного гидроморфизма. Результаты проведенных исследований на Юге России позволили выявить механизмы, тенденции и скорость гидрогенных трансформаций природной среды в условиях развития водохозяйственной деятельности и изменений климата.

Водные экологические проблемы в условиях богарных агроландшафтов. В степных районах на юге РФ локальное переувлажнение и часто сопутствующее ему засоление почв становятся причиной деградации высокопродуктивных чернозёмов и вывода земель из сельскохозяйственного оборота, снижает эффективность хозяйственной деятельности человека в агроландшафте. На переувлажнённых землях формируются вторично гидроморфные комплексы, не имеющие аналогов в естественных степных биомах. Каждый из участков локального переувлажнения имеет небольшую площадь проявления (в среднем 200 м²) но на территории административного района они суммарно могут составить значительные площади и нанести существенный урон общему урожаю.

Явление современного локального переувлажнения земель характерно для плакоров и склонов лесостепных и степных районов и описано в Молдавии, на Украине, Центрально-Чернозёмной области РФ, Восточном Донбассе, Предкавказье. Все исследователи

этого явления едины во мнении, что оно – результат сочетания природных предпосылок (климатические флуктуации, состав поверхностных отложений, рельеф) и хозяйственной деятельности человека, направленной на задержание влаги в почве.

Распашка территорий, использование однолетних культур и агротехнические приёмы, направленные на перевод поверхностного стока во внутрипочвенный – предпосылки повышения грунтовых вод или появления верховодки. Эти процессы усиливаются при соответствующих изменениях климата. По наблюдениям авторов в 1997–2006 гг. в пределах юго-восточной окраины Донецкого края (Ростовская область), основываясь на данных, полученных на 58 обследованных участках очагов локального переувлажнения на плакорах, выявлена зависимость изменения площади переувлажнения земель от отклонения осадков конкретного года от среднесноголетней суммы за период с ноября по май. Так, при обеспеченности осадков $P > 75\%$ наблюдается максимум площадей переувлажнённых земель, при $P < 25\%$ – минимум. Устойчивая тенденция роста площадей, обусловленных переувлажнением в отдельные периоды создаёт проблемную ситуацию [8, 50].

Исследования показали, что переувлажнённые участки имеют сложную структуру, определяемую количеством влаги и засолением почв (рис. 3).

В центре, как правило, располагаются участки (рис. 3, №1) с постоянным сильным переувлажнением, они выделяются по высоким (до 2,5–3 м) зарослям тростника. Из-за переувлажнения агротехническая обработка почвы производится крайне редко или прекращена полностью. Они окружены участком (рис. 3, №2) с периодическим высоким и стабильно средним переувлажнением, занятым пырейными или вейниковыми сообществами, они длительное время агротехнически не обрабатываются. Далее следует территория (рис. 3, №3) со средним переувлажнением, периодически сокращающимся, из-за чего эпизодически распаивается и занята сорнотравьем (распашки текущего года нет). К предыдущему массиву примыкает территория (рис. 3, №4) с регулярно пульсирующим переувлажнением от сильного к среднему (в зависимости от водности года), с разреженными экземплярами тростника или пырея в посевах по распашке этого года. Участки со слабым переувлажнением (рис. 3, №5) явля-

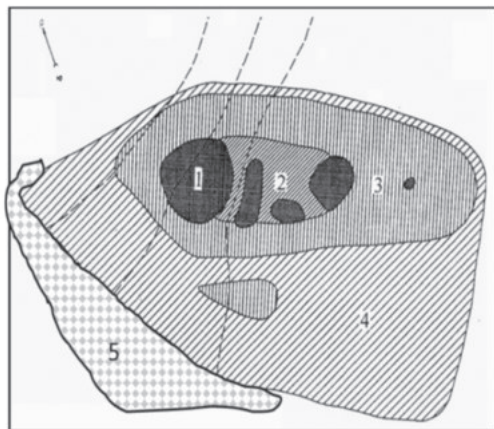


Рис. 3. Пространственная структура растительности на переувлажнённом участке в агроценозе: 1 – сомкнутые заросли тростника южного; 2 – заросли пырея ползучего; 3 – сорная растительность на распахке; 4 – тростник по распахке этого года; 5 – распаханый участок без всходов культурных растений [8]

ются переходом к агроценозам, на них наряду с культурными растениями развито сорнотравье, культурные растения угнетены.

Засоление почв может изменяться от слабого (0–0,025%) до среднего (0,25–0,50%). В составе солей преобладают сульфаты, но при возрастании засоления увеличивается содержание ионов хлора. Источниками засоления являются соленосные скифские глины, содержащие легкорастворимые соли в больших количествах и локальные выходы грунтовых вод, приближающиеся к поверхности или имеющие выходы на поверхность на склонах.

С точки зрения оценки связей растительности с характером увлажнения почв наиболее показательным является почвенный слой 0–50 см, поскольку 95% корней концентрируется на этой глубине. Весной наибольшие запасы влаги, до 280 мм, находятся в зарослях тростника, в остальных сообществах – около 200 мм. Сезонный ход запасов влаги по профилю наиболее выражен в слое 0–50 см и сглаживается с глубиной. В мае запасы влаги по всем точкам профиля превышают августовские показатели на 100 мм в нижних слоях почвы и на 200 мм в верхних.

Нераспахиваемые участки сильного и среднего переувлажнения со временем зарастают корневищными злаками, которые целесообразно оставлять в залежном состоянии и использовать в качестве

сенокосов. На участках слабого переувлажнения, периодически распахиваемых, происходит концентрация сорных видов. Для того чтобы снизить массовое скопление сорняков, желательно такие участки также не подвергать распашке и перевести их в другой вид землепользования – сенокосы (возможно также засевание кормовыми злаками такими, как костры и пыреи) и пастбища.

В итоге проведённых исследований получены фундаментальные результаты: установлены закономерности формирования растительности на вторично гидроморфных биотопах антропогенно трансформированного степного биома в условиях саморегуляции его водного режима на ландшафтном уровне и даны предложения по природопользованию с целью ослабления развития этого процесса. Впервые явление вторичного гидроморфизма на плакорах степной зоны рассмотрено как геоэкологическая проблема; выполнена типология вторично гидроморфных природных комплексов (ПТК) и дана им комплексная характеристика на основе экспериментальных данных; выявлено флористическое и фитоценотическое разнообразие, продуктивность растительности вторично гидроморфных ПТК. Сделано заключение о том, что видовой состав растительности вторично гидроморфных биотопов не поддерживает ботаническое разнообразие степной зоны, а преобладание сорных видов создаёт угрозу биологического загрязнения агроландшафтов. Установлены виды – индикаторы динамических категорий солевого состава почв; даны предложения по природопользованию в условиях проявления вторичного гидроморфизма и путям использования этих ПТК.

Орошаемое земледелие и сопутствующие водные экологические проблемы. Вывод земель из сельскохозяйственного оборота из-за подтопления и засоления почв до сих пор остаётся основной проблемой в орошаемом земледелии. На Европейской части РФ существуют природные предпосылки к развитию негативных процессов при орошении: равнинный рельеф, слабая дренированность, лессовидные, глинистые засоленные отложения морского генезиса. Антропогенная причина – избыточные нормы полива, приводящие к подъёму уровня грунтовых вод, подтоплению прилегающих земель и засолению почв.

Региональные водно-экологические проблемы в условиях развития орошаемого земледелия слабо проработаны в плане их даль-



Рис. 4. Опасность переувлажнения и засоления земель под влиянием изменения климата и гидромелиорации [49]

нейшего развития и рекомендаций в связи с прогнозируемыми изменениями климата. Выполненное картографическое исследование в лаборатории динамики наземных экосистем ИВП РАН [49] позволило выявить территории, имеющие тенденции в направлении развития негативных процессов – подтопления и засоления почв по состоянию на 1982–2006 гг. (рис. 4, 5). На их основании для всех субъектов Южного федерального округа рассчитан процент

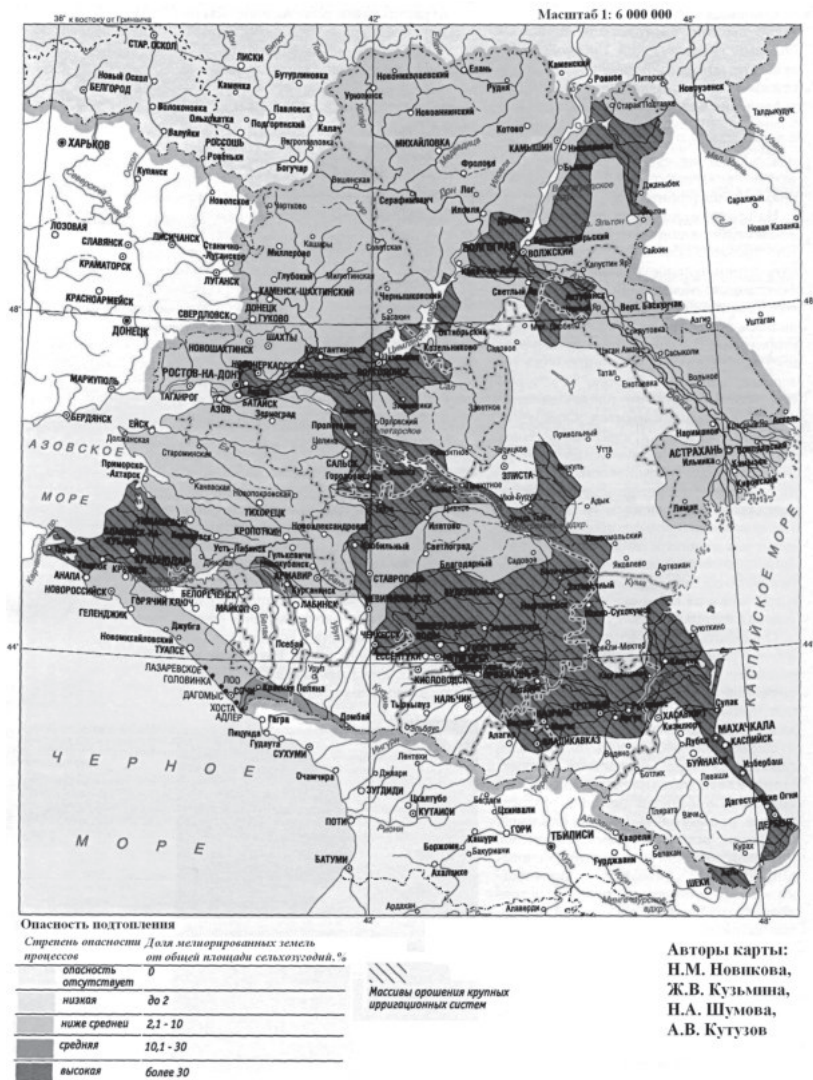


Рис. 5. Опасность подтопления земель под влиянием гидромелиорации [49]

площадей, с развитием этих явлений. На основании существующих тенденций изменения климатических параметров составлена карта опасности дальнейшего развития существующих негативных про-

цессов под их влиянием в условиях возрастания климатической влагообеспеченности.

Прогнозная оценка существующей тенденции изменения гидро-термических условий на территории Южного Федерального округа выявила для большей её части слабую, а для ряда субъектов федерации (Ростовской, Астраханской областей, Ставропольского края) – среднюю степень опасности (рис. 4). Развитие современного гидроморфизма из-за подтопления земель в результате гидромелиорации в наибольшей степени затронула территорию Ставропольского края, Ростовской и Волгоградской областей, республики Калмыкия (рис. 5).

Рассмотрение широкомасштабной трансформации водного режима крупного региона на юге Европейской части РФ в условиях современной флуктуации климата и водохозяйственной деятельности человека как факторов изменения биоразнообразия было выполнено впервые.

Показано, что для степной зоны на фоне превращения её в агроландшафт, развитие современного гидроморфизма становится важным фактором расселения аллохтонных и автохтонных организмов и формирования биотопических структур, создающих новые незанятые экологические ниши, в которых возникают условия для создания сообществ, сочетающих в себе организмы различной экологии. В то же время новая среда обеспечивает сохранение редких и охраняемых видов.

Интенсивная хозяйственная деятельность на фоне современных изменений климата в лесостепных и степных районах на юге РФ обусловила возникновение переувлажнения на обширных территориях. Исходно гидроморфные ландшафты трансформировались в гидроморфные. Развитие засоления, сопутствующего переувлажнению, обусловило потерю плодородия и вывод этих земель из сельскохозяйственного оборота. Это составляет суть современных водных экологических проблем в этом регионе. Несмотря на различные ландшафтные условия и причины, провоцирующие развитие гидроморфных природных комплексов, процессы неспецифичны – они развиваются по природному типу.

Исследование формирования составляющих водного баланса агроэкосистем лесостепной и степной зон. В основу изучения зако-

номерностей формирования составляющих водного баланса агроэкосистем положен подход, разработанный в рамках географического и прикладного направлений учения о почвенных водах и их ресурсах, позволивший принципиально по-новому подойти к оценке водообеспеченности сельскохозяйственных культур, учитывая их потребность в воде на протяжении роста и развития, а также учитывая закономерности формирования почвенно-гидрологических условий [74, 75]. Использование данного подхода позволило оценить ресурсы почвенных вод и водообеспеченность агроценозов лесостепной и степной зон как при применении традиционной агротехники, так и при проведении различных мероприятий «сухого земледелия», направленных на повышение водообеспеченности сельскохозяйственных культур, а также выявить резервы возможного повышения их водообеспеченности.

Исследования показали, что лесостепная и степная зоны подвержены систематическим засухам, которые в различных частях этой территории отличаются интенсивностью и повторяемостью. Потребность в воде ранних яровых культур в средний по водности год обеспечивается на 80% на северо-западе региона, снижаясь до 30% к низовьям Волги. При этом можно отметить, что ресурсы почвенных вод расходуются крайне непродуктивно: доля транспирации в суммарном испарении ранних яровых культур составляет 30–40% [73, 76].

В результате применения наиболее известных приемов агрогидрологического регулирования почвенных вод – задержание стока талых вод на сельскохозяйственных полях, зяблевая пахота, применение черных паров – происходит увеличение весенних запасов воды в почве, что в свою очередь приводит к увеличению транспирации. Расчёты показали, что в случае посева ранних яровых культур 65% от приращения весенних запасов воды в почве, полученного за счет агрогидрологических мероприятий, идет на транспирацию, а 35% расходуется на испарение воды почвой. В результате проведения мероприятий по задержанию стока талых вод на сельскохозяйственных полях, зяблевая пахота и парование полей могут привести к увеличению водообеспеченности посевов ранних яровых культур на юге Русской равнины на 10–20%. Это позволяет в средний по водности год избежать засух на северо-западе лесостепной зоны. При применении мульчирования почвы растительными остатками

на значительной части лесостепной зоны в средний по водности год возможно полное прекращение засух, а на остальной части рассматриваемой территории водообеспеченность посевов может возрасти на 60% [75].

Изучение и мониторинг трансформации аридных экосистем при гидротехническом строительстве и их реабилитация в современных условиях проводились в Приаралье и сопредельных аридных территориях Средней и Центральной Азии [67, 68, 66, 42, 56, 57, 90, 92, 47, 25, 26, 32, 82, 87]. Они посвящены изучению экологических последствий крупнорегиональных водохозяйственных преобразований, в которых соединились сопряженные проблемы нерационального землепользования и предельно допустимых объёмов изъятия стока. Как следствие – из сельскохозяйственного оборота выведены по причине засоления самые лучшие земли, опустыниванию подвержены уникальные экосистемы тугаев дельтовых равнин [67, 68, 66, 82, 87, 91, 25, 32, 37] утеряно высокопродуктивное солоноватоводное озеро-море.

Тугаи – это особый реликтовый тип растительности Средней Азии, сохранивший былые черты третичной флоры (фото 1–2). Современные тугаи – это пойменные древесно-кустарниковые и травяные сообщества, распространённые в поймах рек Передней, Средней и Центральной Азии, где в настоящее время повсеместно происходит неуклонное сокращение их ареала распространения. Основная часть (до 95% площади) современных тугаев относится к деградированным экосистемам, которые характеризуются упрощенной структурой сообществ, пониженным видовым разнообразием, слабыми разногодичными изменениями состава сообществ и пониженной продуктивностью (фото 1).

Основными причинами повсеместной деградации тугаев является региональное косвенное антропогенное воздействие, связанное с зарегулированием стока рек (рис. 6), а также естественные климатические изменения. Сопутствующими факторами деградации является также локальное прямое антропогенное воздействие: вырубки и перевыпас.

Все эти факторы разными способами приводят к однотипным последствиям: деградации аллювиальных тугайных почв и образованию на их месте солончаков луговых, типичных или остаточных



Фото 1. Полная смена турангового тугая в результате засоления почв на солончаковую погибающую растительность (*Ass. Halostachys belangeriana-Alhagi pseudalhagi*) в заповеднике Бадай-Тугай, сентябрь 2010 г. [32]



Фото 2. Разреженный деградирующий гребенщиково-туранговый тугай (*Ass. Populus ariana-Tamarix hispida*) в заповеднике Бадай-Тугай, сентябрь 2009 г. [32]

средней и сильной степени засоления, часто и глубокозасолённых, вплоть до глубины 3 м (фото 2).

Нашими многолетними исследованиями установлено, что для искусственного лесовосстановления тугаев необходимо применять специальные методики восстановления сообществ в зависимости от степени и характера засоления деградированных почв и возможностей обводнения (т.е. использование различных по качеству вод – речных или коллекторно-дренажных, а также применение различного режима увлажнения территорий: от минимального редкого первоначального полива при недостатке воды, до ежегодного искусственного заливания). При лимитированном использовании коллекторно-дренажных вод слабой и средней степени засоления возможно создание только галофитных вариантов тугаев. В тоже время

при использовании речных вод в достаточном количестве возможно восстановление типичных тугайных экосистем даже на сильно- и глубокозасоленных (до 2,5 м) почвах [32].

Катастрофическое развитие Аральского кризиса [90, 92] привело летом 2009 г. к практически полному высыханию акватории Арала [27]. Возникла проблема предотвращения пыльных бурь и выноса солей с обсохшего дна моря, решение которой тесно связано с рекультивацией солончаков путём фитомелиорации [27, 28, 30]. Работы по фитомелиорации автоморфных солончаков морского и пойменного происхождения проводились сотрудниками лаборатории в Южном Приаралье в 2002–11 гг. совместно с Институтом биоэкологии Академии наук Республики Узбекистан при финансовой поддержке Университета им. Бен-Гуриона (Израиль), фонда USAID (США) и Европейской комиссии [87, 27, 28, 30, 86]. Проводимые опытные работы были признаны вполне успешными, однако приживаемость, дальнейшее выживание галофитных видов растений и формирование жизнеспособных экосистем на обсохшем дне Арала существенно зависели от первоначального засоления почвогрунтов, от засоления и динамики падения грунтовых вод, а также от сезон-

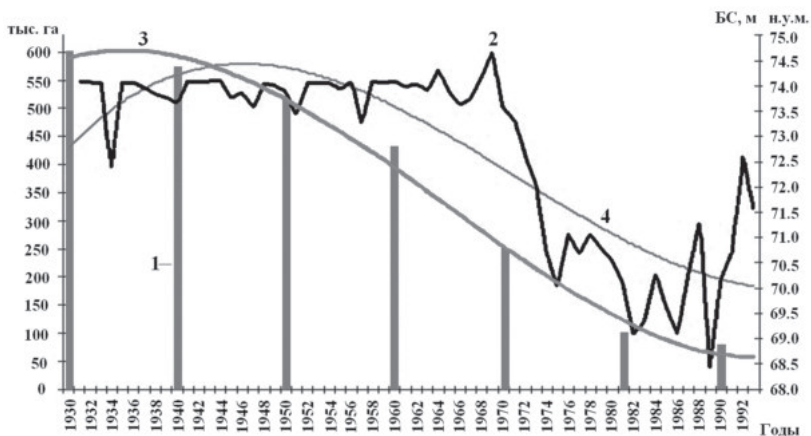


Рис. 6. Зависимость сокращения тугайных площадей от падения уровня воды в нижнем течении реки Амударьи (1890–1993 гг.). Условные обозначения: 1 – площадь тугаев в тыс. га; 2 – среднегодовой уровень воды в низовьях Амударьи (БС, м н.у.м.); 3 и 4 – полиномиальные кривые сокращения площади тугаев (3) и уровня воды в реке Амударье (4) [32]



Рис. 7. Модель динамики тугайных и солончаковых экосистем (формаций растительности) в дельте Амударьи [27, 91, 92]

ных изменений в засоленности почв по профилю, что связано с климатическими флуктуациями.

Оценка воздействия климатических компонент экосистем для региона Приаралья показал, что основная тенденция изменений здесь в настоящем и будущем – это значительно более тёплые и влажные зима и холодное полугодие [37]. Второй особенностью совокупных климатических изменений для данного регионе является очень сильное увеличение аридизации в основной период вегетации – весенне-летне-осенний и, особенно весной, что существенно ухудшит и без того сложные условия фитомелиорации или выращивания сельскохозяйственных культур. Выявленные тренды изменения климатических компонент негативно отразятся на естественных экосистемах и агроценозах региона Приаралья и сопредельных территорий Средней Азии. Для поддержания сельскохозяйственного производства здесь потребуется увеличение мелиоративного обводнения, поскольку будут формироваться больше засух в весенний, летний и осенний сезоны года. Без дополнительных усилий по обводнению сельскохозяйственных, пойменных и дельтовых территорий будет нарушена естественная модель динамики экосистем. Будут формироваться более пустынные ксерофитные, экстроксеро-

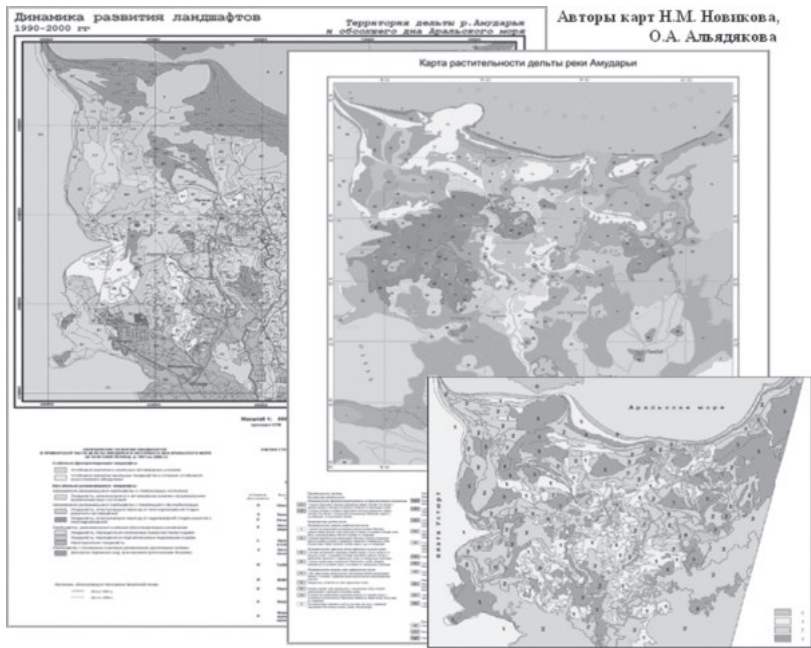


Рис. 8. Оценка и мониторинг трансформации природных экосистем в условиях экологического кризиса Аральского региона [89]

фитные и экстрогалофитные экосистемы (рис. 7), в то время как мезофитные, ксеромезофитные, пойменные и дельтовые на прежде слабо и среднесолённых почвах подвергнутся полной необратимой редукции и опустыниванию [37, 91].

Для региона Аральского кризиса накоплена эколого-географическая информация; для Южного Приаралья разработана концепция мониторинга за состоянием экосистем и структура ГИС для наблюдения за нестабильными ландшафтами; создана серия карт эколого-географической тематики, разработана методика и оценочная карта изменений экосистем [55, 89, 91] (рис. 8).

Динамика экосистем и экологические проблемы создания гидротехнических сооружений и водохранилищ при них. Основными факторами и процессами вызывающими негативные изменения пойменных экосистем при гумидном потеплении климата, а также в результате воздействия любых гидротехнических сооружений являются: стабилизация режима УГВ в поймах (из-за выравнивания

УВ в реках), климатическое подтопление (в результате увеличения выпадения атмосферных осадков; изменение паводкового затопления (в основном сокращение), повышение (для низконапорных гидротехнических сооружений – НГС) или понижение (для средненапорных – СГС и высоконапорных – ВГС) общей обводнённости поймы, изменение характера и интенсивности почвообразования (повышение или понижение оглеения и/или ожелезнения, увеличение засоления, появление отакыривания и др.). Эти процессы приводят к нарушению структурно-функциональной организации экосистем и развитию сукцессионных смен. Глубина и скорость трансформации экосистем зависит от интенсивности и продолжительности антропогенного воздействия или климатических изменений [31, 38, 39].

В результате исследований, проведенных в центральной (Германия) и восточной (РФ) Европе разработан алгоритм оценки влияния низконапорных гидротехнических сооружений (НГС) на наземные пойменные экосистемы [83, 84, 85, 19, 21] и апробирован на примере оценки воздействия низконапорных гидротехнических сооружений на динамику наземных экосистем зоны широколиственных лесов центральной и восточной Европы, а также зоны южной тайги в РФ [29, 30, 38].

Установлено, что при создании низконапорных гидротехнических сооружений происходят медленнотекущие (20–50 лет) изменения в цепи геоэкологических связей, которые инициируются изменениями режима речного стока и режима уровня грунтовых вод. Изменение амплитуды колебания УГВ в пойме является ведущим процессом последующих изменений в пойме. Работы подразделяются на несколько этапов, включающих анализ как гидрологических и климатических изменений среды, так и нарушений в почвенном и растительном покрове: установлен список видов растений индикаторов зарегулирования НГС для зоны широколиственных лесов и южной тайги, на основе распространения которых разработан метод оценки опасности нарушений для экосистем под воздействием НГС и необходимости восстановительных мероприятий. Составлена «Прогнозная схема изменения растительности в поймах рек широколиственной зоны Восточной и Центральной Европы при изменении обводнённости территории», в которой для различных экологических

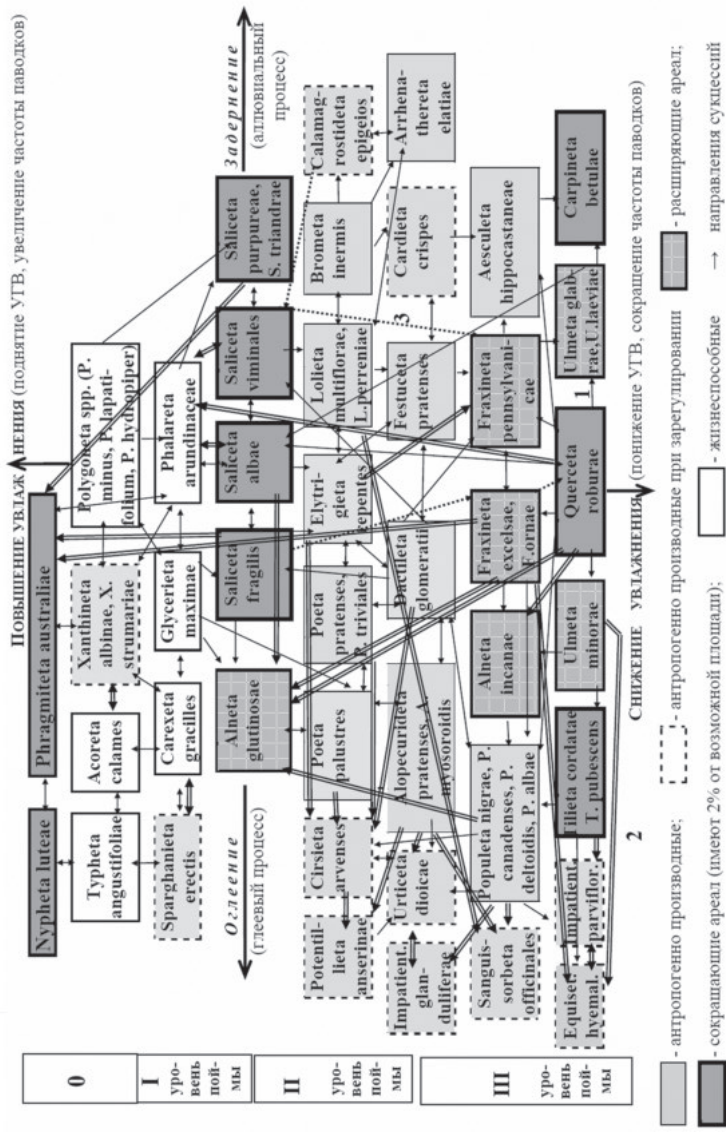


Рис. 9. Модель динамических связей и характера современного состояния экосистем (формаций растительности) пойменных местообитаний зоны широколиственных лесов Центральной и Восточной Европы. Пойменные уровни: 0 – постоянно затопленные или длительно затопляемые территории (на наибольшую глубину 0–0,5 м), I – низкая пойма, II – средняя пойма, III – верхняя пойма. Направления сукцессий: → – однопольные, ↔ – двухпольные; Характер сукцессий: 1 – естественные или «условно» естественные, 2 – антропогенные при зарегулировании НПС, 3 – антропогенные деградационные (восстановительные) при зарегулировании НПС [21]

уровней пойм прослежены стадии изменения естественных сообществ в результате антропогенного зарегулирования рек НГС. Создана «Динамическая модель формаций пойменных местообитаний зоны широколиственных лесов» (рис. 9) которая полностью отражает все возможные трансформации пойменных экосистем (направление и вид сукцессионных изменений как естественных, так и природных) в зависимости от поемного и дернового процессов (положения УГВ, режима затоплений, характера и степени ожелезнения и оглеения в почвах). Разработанная «Динамическая модель» даёт представления о тенденции ареалов пойменной растительности в настоящее время, возможность долгосрочного прогноза при изменениях дернового и поемного процессов, а также является основным макетом полного комплекса пойменных экосистем для зоны широколиственных лесов при восстановительных мероприятиях на нарушенных в результате зарегулирования пойменных территориях.

Для решения проблемы деградации пойменных экосистем уже находящихся под влиянием НГС разработаны мероприятия и экологические ограничения по управлению режимом речного стока.

Проблемы, обусловленные созданием водохранилищ, многочисленны. Для изучения «водохранилищного» гидроморфизма (перевлажнения), одного из наиболее широко распространённых типов современного гидроморфизма на юге РФ, были проведены полевые исследования в различных ландшафтных условиях на побережьях Краснодарского, Цимлянского, Веселовского и Пролетарского водохранилищ. Исследования показали, что в зоне гидрологического воздействия (заливание и близко залегающие к поверхности грунтовые воды) наблюдается смена степной растительности на луговую, почвы формируются также луговые. В зоне гидрогеологического влияния, которое наиболее выражено на Веселовском водохранилище, вследствие подпора сильно засоленных грунтовых вод, создаваемого водохранилищем, широкое развитие получило засоление почв, вплоть до формирования мокрых солончаков, на расстоянии от 50 до 500 м от уреза воды в летний период. На Цимлянском водохранилище в условиях заливания распространены луговые и древесные сообщества – ивово-тополевые, ветловые, аморфово-ясеньевые. На Веселовском и Пролетарском – тростниковые и лугово-солончаковые.

Зоны сработки водохранилища испытывают наиболее контрастные смены увлажнения, не имеющие аналогов в природе. Они ежегодно от 6 до 10 месяцев находятся под водой. Обследование Краснодарского водохранилища показало, что в период с июня по ноябрь отметки уровня воды опускаются на 4 м и постепенно выходят на дневную поверхность из-под воды всё новые участки дна водохранилища, лишённые почв и растительности [64].

Исследования показали, что на побережьях водохранилищ наибольшие трансформации биоты происходят при затоплении и подтоплении земель. Таким условиям на юге России удовлетворяют в наибольшей степени территории Ставропольского и Краснодарского краев, Ростовской и Астраханской областей, республики Калмыкия.

Установлены локальные закономерности формирования пространственной экологической структуры, ботанического и почвенного разнообразия в результате создания искусственных водоёмов: крупных водохранилищ (в Ростовской, Волгоградской и Саратовской областях), водных объектов Калмыкии [53]; прудов Воронежской области [46]. Выявлены особенности формирования орнитофауны на островах в средней части Волгоградского водохранилища [72].

В результате исследования экологических последствий для экосистем при создании горных водохранилищ были выделены и охарактеризованы основные временные этапы динамики животного населения; на основании закономерностей трансформации биоты, установленных на Зейском водохранилище, дан прогноз основных тенденций изменения природной среды и животного населения в зоне влияния созданного Бурейского водохранилища и проектируемого Нижнезейского (рис. 10, 11) [63]; разработана система экологического мониторинга Приамурья; разработана и предложена к внедрению схема ООПТ в бассейне реки Буреи; выполнена предварительная оценка эколого-экономического ущерба животному населению от создания Буреинского гидроузла [55, 60].

Прогноз основных тенденций изменений экосистем в зоне влияния Бурейского водохранилища, основанный на выявленных закономерностях при мониторинге Зейского водохранилища оказался очень близким к реальности и позволил обосновать систему ООПТ.

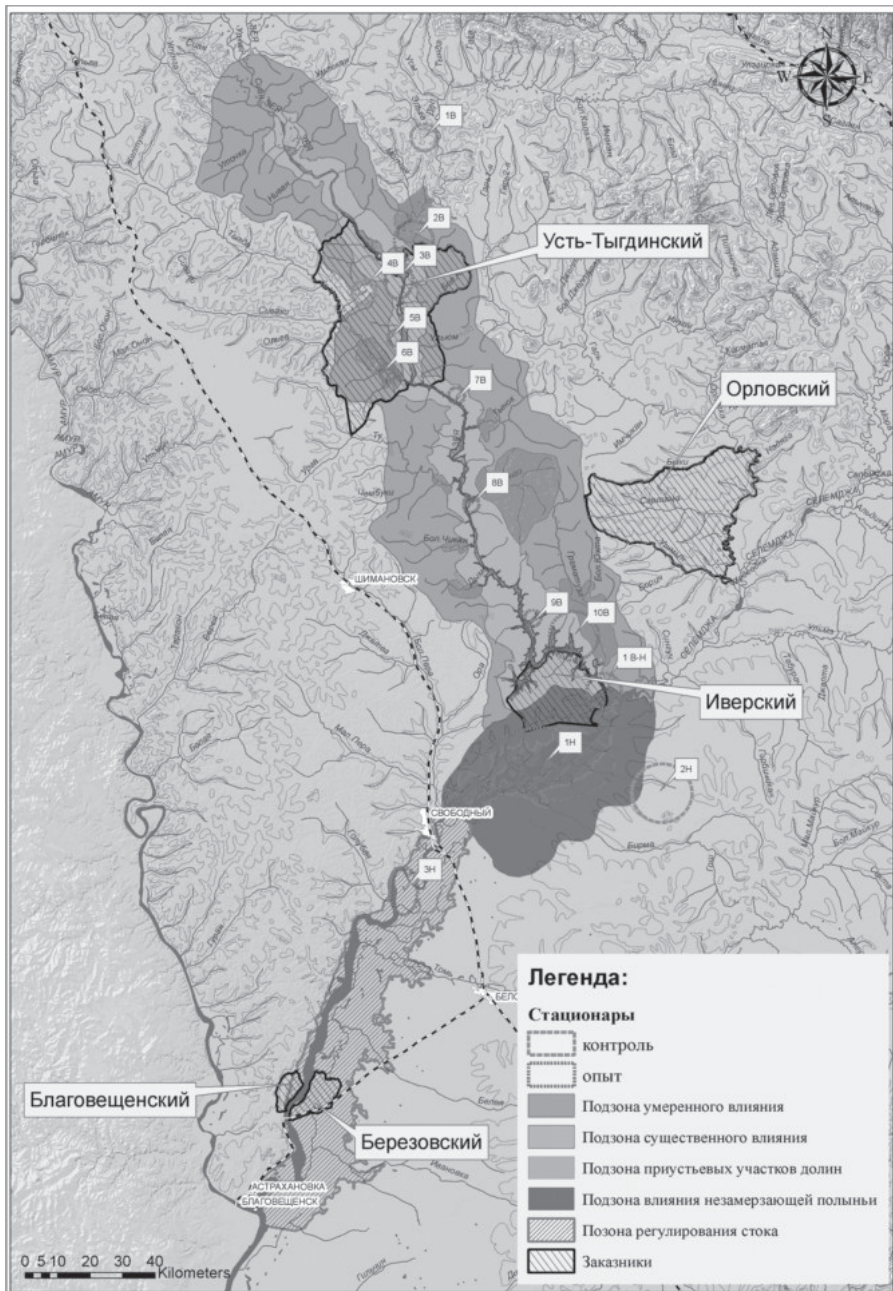


Рис. 10. Влияние на население наземных позвоночных проектируемого Нижнеизыевского водохранилища [63]

Разработка методов оценки и прогноза изменения экосистем. Сотрудниками лаборатории исследуются отдельные компоненты наземных экосистем (растительность, животное население, почвы, грунтовые и поверхностные воды) в зонах влияния горных и равнинных водохранилищ, а также в долинах рек Дальнего Востока, Центральной и Южной России, Центральной Европы, Центральной и Средней Азии с целью разработки оценочных показателей, методик и методов покомпонентной и результирующей оценки естественного (климатического) и антропогенного (гидротехнического) воздействия на наземные экосистемы.

В настоящее время Н.М. Новиковой с соавторами [52, 44] на основании совокупной оценки изменения нескольких компонентов экосистем (почв, растительности, грунтовых вод) разработана методика оценки гидротенной трансформации природных комплексов побережий водохранилищ в связи с антропогенным гидротехническим воздействием.

Ж.В. Кузьминой с соавторами для пойменных, долинных и дельтовых экосистем разработан алгоритм оценки их трансформаций по совокупному воздействию изменений нескольких компонент экосистемы (климата, гидрологии, почв, растительности, грунтовых вод) [19, 21, 29, 31, 23, 24]. Заключительным этапом этой оценки является использование «Метода оценки нарушений в околосовхозных экосистемах по биологическим критериям и показателям при изменении обводненности территорий» [12, 7, 33, 38]. Эта поэтапная оценка применима для долинных, пойменных и дельтовых экосистем, подвергшихся не только антропогенным (гидротехническим) влияниям, но и естественным (климатическим).

С.А. Подольским с соавторами была разработана оценка нарушений в экосистемах вследствие гидротехнического строительства по одному из живых компонентов экосистемы – наземным позвоночным [63]. Несмотря на то что данная оценка изменений экосистем была разработана непосредственно для учёта гидротехнического воздействия, она применима также и при учёте изменений водного режима территорий в результате природных процессов.

Исследование и реабилитация мелиоративно нарушенных экосистем. Исследуется динамика экосистем болот, пойм и долин рек

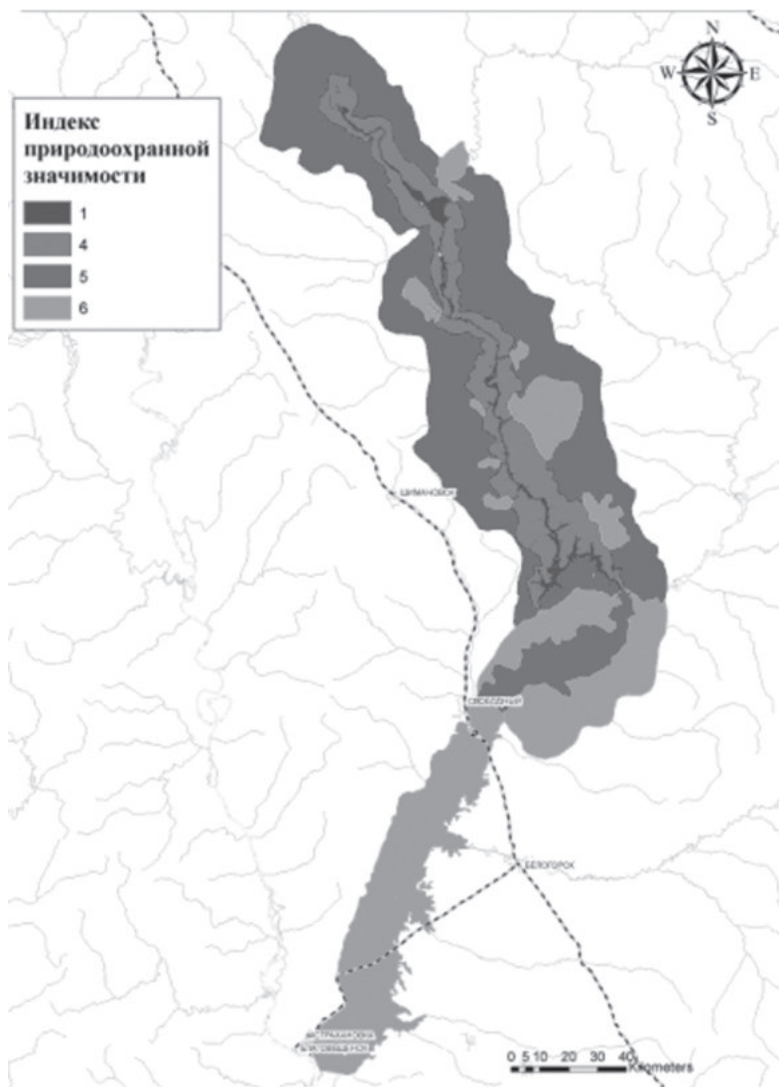


Рис. 11. Прогноз изменений индекса природоохранной значимости (Изп) проектируемого Нижнезейского водохранилища в период начала стабилизации экосистемы [63]

под влиянием естественных (климатических) и антропогенных (гидромелиорация, зарегулирование стока) изменений в государственном заказнике «Журавлиная родина» (Московская область). Изучаются изменения наземных экосистем осушенных торфяников под



Рис. 12. Опытный участок обводнения в заказнике «Журавлиная родина»

влиянием обводнения, проведённого с использованием различных проектных решений (рис. 12).

Таким образом, в зоне Южной Тайги проводится многолетний мониторинг экосистем (по растительности, почвам, грунтовым и поверхностным водам, орнитофауне) осушённых торфяников, а также экосистем долин рек в естественном и антропогенно нарушенном состоянии. Ведутся исследования динамики характеристик местообитаний по индикаторным видам птиц [12, 7] и по растительности с использованием экологических амплитудных шкал по показателю увлажнения, проводятся также мониторинговые исследования с использованием разработанного в лаборатории «Метода оценки нарушений в околородных экосистемах по биологическим критериям и показателям при изменении обводнённости территорий» [33, 38, 31, 29].

Рекомендации по охране, реализованные на практике. Разработанные предложения по созданию Особо охраняемых природных территорий (ООПТ) на территории Московской области и Приморья (автор С.А. Подольский) переданы в администрацию областей. Большая часть проектов уже реализована.

Предложения по экологически щадящему природопользованию на территории Талдомского района Московской области (автор

О.С. Гринченко) переданы в администрацию Талдомского района, осуществляются специальные севообороты и структура посевов с целью поддержания уникальной популяции серого журавля в бассейне реки Дубны.

Эколого-географическая база данных на территорию Южного Приаралья (авторы Н.М. Новикова, Ж.В. Кузьмина, Г.Ю. Трофимова) передана в Комитет по охране окружающей среды республики Каракалпакстан (Узбекистан) и Нукусский государственный университет для обучения студентов.

В работе по Госконтракту с Министерством охраны окружающей среды (2012–14 гг.) по разработке экологического нормирования в применении к водному режиму экосистем и экотонов речных пойм лабораторией была решена важная фундаментальная задача – на основании собственных исследований охарактеризованы причинно-следственные связи в системе «речной сток → водный режим основных биотопов поймы → биотические комплексы» и сделана оценка их значимости.

Выводы

Гидрогенная динамика экосистем может быть обусловлена внешними (природными и антропогенными) и внутренними (саморазвитие) причинами. Оценка направленных изменений в экосистемах чрезвычайно сложная задача, она может выполняться как покомпонентно, так и в целом, для всей экосистемы. Сегодня, в условиях изменяющегося климата, оценка и прогноз динамики экосистем – важнейшие задачи современной науки.

За время своего существования в Институте водных проблем РАН лабораторией Динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора была выполнена большая теоретическая и практическая научная работа по решению проблемы гидрогенной динамики наземных экосистем.

Проведена систематизация теоретических и практических задач, связанных с экологическим нормированием в применении к водному фактору. Выявлены информативные биологические показатели, адекватно отображающие экологически значимые изменения режима речного стока и водного режима биотопов на различных морфологических элементах пойменного рельефа.

Установлены закономерности динамики водного режима различных морфологических частей пойм и структуры экотонов при изменении режима речного стока и флуктуациях климата [80].

Решён один из узловых вопросов экологического нормирования – выявлены информативные и объективные критерии, способные адекватно отражать экологически значимые изменения режима речного стока и водного режима различных морфологических частей пойм (обеспеченность длительности и частоты заливания, изменение амплитуды сезонного и разногодичного колебания уровня грунтовых вод).

Охарактеризованы механизмы динамики экосистем на основании разностороннего анализа имеющихся данных об антропогенных и естественных изменениях водного режима на рассматриваемых территориях.

Получены данные о развитии процессов, сопутствующих изменению водного режима территорий в различных географических зонах.

Решена одна из центральных задач в проблеме – определены оптимальные, допустимые и критические значения водного фактора, при которых происходят необратимые перестройки структуры популяций биологических видов, ресурсного потенциала, биоразнообразия и функционирования экосистем.

Обоснован выбор критериев, на основании которых можно судить о допустимых пределах регулирования режима речного стока в масштабах речного бассейна.

Определены некоторые универсальные ограничения и параметры, которые должны соблюдаться при освоении гидроэнергоресурсов Дальнего Востока РФ: установлено, что расстояния между зонами трансформации природной среды соседствующих гидроузлов в проектируемых каскадах должны составлять не менее 80–100 км; даны рекомендации по количеству, размещению и площадям особо охраняемых природных территорий в районах активного современного гидротехнического строительства; обоснован вывод об экологической опасности строительства плотин на р. Амур.

За последние годы в лаборатории Динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора ИВП РАН в соответствии с поставленными задачами по разработке оценочных динамических показателей как для неживых, так и для живых компонент экосис-

тем, был разработан показатель для оценки изменений климатических компонент экосистем; были установлены показатели динамической оценки совокупного влияния климатических компонент (температуры и осадков); были разработаны оценочные показатели для нескольких живых компонент экосистем – растительности и животного населения (наземных позвоночных и птиц), включая структурно-функциональные особенности орнитокомплексов в целом; установлен индикационный оценочный показатель быстрой трансформации экосистем торфяников; установлен оценочный показатель процесса разрушения береговой экосистемы; разработаны методические подходы и методы оценки нарушений во всей экосистеме по совокупному анализу трансформаций нескольких её компонентов.

Перспектива дальнейших исследований лаборатории связана с развитием теоретических представлений: о закономерностях изменений наземных экосистем в современных условиях изменяющегося климата и усиления гидротехнического воздействия, о закономерностях проградационной динамики экосистем – их адаптации и стабилизации в измененных гидрологических и климатических условиях, а также закономерностях восстановления экосистем после снятия антропогенных нагрузок. Все это даст возможность подойти к непосредственному прогнозу трансформации экосистемного покрова регионов и планеты при различных вариантах развития событий в условиях естественных и антропогенных (гидротехнических) изменений среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б. Вопросы создания и рационального использования водохранилищ // Воды суши: проблемы и решения. М.: ИВП РАН, 1994. С. 414–435.
2. Авакян А.Б., Лебедева И.П. Водоохранилища XX века как глобальное географическое явление // Известия АН. Серия географическая. №3, 2002. С. 13–20.
3. Антонов А.И., Яковлев А.А., Подольский С.А. Видовой состав птиц среднего течения реки Зeya (Амурская область) // Фауна Урала и Сибири. Региональный фаунистический журнал. №2, 2015. С. 23–43.
4. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / Отв. ред. Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. М.: Наука, 2003. 367 с.
5. Будыко М.И. Эволюция биосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 488 с.

6. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2012. 576 с.

7. Волков С.В., Гринченко О.С., Свиридова Т.В. Влияние погодных и климатических колебаний на изменение сроков осенней миграции серого журавля (*Grus grus*) в северном Подмоскowie // Зоологический журнал. Т. 95, №10, 2016. С. 1182–1191.

8. Волкова Н.А., Назаренко О.Г. Геоэкологическая характеристика природно-территориальных комплексов современного гидроморфизма (на примере юго-восточных отрогов Донецкого кряжа). М.: РАСХН, 2005. 237 с.

9. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2014. 61 с.

10. Глазовский Н.Ф. Аральский кризис: причины возникновения и пути выхода / Отв. ред. Н. Т. Кузнецов. М.: Наука, 1990. 134 с.

11. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1998 году». М.: МПР, 1999. 573 с.

12. Гринченко О.С., Свиридова Т.В. Сохранение птиц в условиях современного сельского хозяйства: практика взаимодействия с земледельцами // Материалы I Международной орнитологической конференции «Птицы и сельское хозяйство: современное состояние, проблемы и перспективы изучения», 17–18 ноября, 2016 г. М.: Знак, 2016. С. 60–66.

13. Дарманов Т.А., Подольский С.А., Красикова Е.К. Роль климатических факторов в динамике численности волка и объектов его охоты на территории Зейского заповедника // Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов. Материалы V международной научно-практической конференции: Климат, экология, сельское хозяйство Евразии. 26–29 мая, 2016. Иркутск, 2016. С. 179–184.

14. Зайдельман Ф.Р., Тюльпанов В.И., Ангелов Е.Н., Давыдов А.И. Почвы мочарных ландшафтов – формирование, агроэкология и мелиорация. М.: Изд-во Московского университета, 1998. 159 с.

15. Залетаев В.С. Изучение наземных экосистем в цикле исследования водных проблем // Водные проблемы на пороге нового тысячелетия. М.: Наука, 1999. С. 306–315.

16. Залетаев В.С. Экологически дестабилизированная среда (экосистемы аридных зон в изменяющемся гидрологическом режиме). М.: Наука, 1989. 150 с.

17. Клиге Р.К., Данилов И.Д., Конищев В.Н. История гидросферы. М.: Научный мир, 1998. 368 с.

18. Кочарян А.Г., Лебедева И.П. Гидроэкология: водохранилища – баланс противоречий // Инженерная экология. №5, 2014. С. 13–31.

19. Кузьмина Ж.В. Оценка последствий изменения режима речного стока для пойменных экосистем при создании малых гидротехнических сооружений на равнинных реках // Метеорология и гидрология. №8, 2005. С. 89–103.

20. Кузьмина Ж.В. Анализ многолетних метеорологических трендов на Юге России и Украины (от лесостепи до пустынь) // Аридные экосистемы. Т. 13, №32, 2007а. С. 47–61.

21. Кузьмина Ж.В. Воздействие низконапорных гидротехнических сооружений на динамику наземных экосистем зоны широколиственных лесов Центральной и Восточной Европы. Автореф. дисс. ... докт. г.н. Москва. ИВП РАН. 2007б. 44 с.

22. Кузьмина Ж.В. Динамические изменения экосистем и вопросы их оценки // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1, №1, 2017. С. 10–25 (<http://www.ecosystemsdynamic.ru>).

23. Кузьмина Ж.В., Каримова Т.Ю., Трёшкин С.Е., Феодоритов В.М. Влияние климатических изменений и зарегулирования речного стока на динамику растительности долин рек // Использование и охрана природных ресурсов в России. №2 (116), 2011а. С. 34–40.

24. Кузьмина Ж.В., Каримова Т.Ю., Трёшкин С.Е., Феодоритов В.М. Воздействие антропогенного регулирования речного стока и климатических изменений на динамику растительности долин рек // Антропогенная динамика растительного и почвенного покровов лесной зоны. Сборник научных трудов кафедры земледелия и растениеводства. М.: Государственный Университет по землеустройству, 2011б. С. 125–147.

25. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Засоление почв и динамика пойменной – тугайной растительности: на примере регионов Юго-Восточного Прикаспия и Приаралья // Почвоведение. №6, 1997. С. 726–735.

26. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Современное состояние флоры и растительности заповедника «Бадай-Тугай» в связи с изменением гидрологического режима // Ботанический журнал. Т. 86, №1, 2001. С. 73–84.

27. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Формирование растительности на солончаках обсохшего дна Аральского моря в изменяющихся климатических условиях // Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук. №1, 2009. С. 32–35.

28. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Влияние климатических флуктуаций и способов посадки галофитных кустарников на результаты фитомелиорации солончаков Приаралья // Аридные экосистемы. №3 (43), 2010. С. 67–76.

29. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Метод оценки гидротехнического воздействия и климатических изменений на экосистемы // Антропогенная динамика почв и растительности лесной зоны. М., 2011а. С. 148–163.

30. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Результаты многолетнего мониторинга развития галофитных растений на солончаках Приаралья // Аридные экосистемы. №3 (48), 2011б. С. 23–37.

31. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Оценка последствий гидротехнического воздействия на экосистемы пойменных гидроморфных и полуавтоморфных территорий // Актуальная биогеография. Вопросы географии. Вып. 134. М.: Издательский дом «Кодекс», 2012а. С. 298–313.

32. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Тугаи и возможности их восстановления в современный период // Аридные экосистемы. №3 (52), 2012б. С. 44–59.

33. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Влияние климатических и гидрологических изменений на трансформацию естественных и антропогенно нарушенных в результате мелиорации экосистем зоны южной тайги // Рекультивация и использование залежных земель в Нечерноземной зоне России: теория и практика. Материалы Международной научно-практической конференции ГНУ ВНИИМЗ Россельхозакадемии. Тверь. 2012. С. 89–109.

34. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Климатические изменения в бассейне Нижней Волги и их влияние на состояние экосистем // Аридные экосистемы. Т. 20, №3 (60), 2014а. С. 14–32.

35. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Обусловленные режимом водных объектов биологические показатели, отражающие структурно-функциональные изменения околоводных наземных экосистем // Изменение состава и структуры ландшафтов в условиях техногенеза. Сборник научных трудов кафедры земледелия и растениеводства, посвященный 90-летию кафедры / Под общ. ред. Л.П. Груздевой. М.: Государственный университет по землеустройству, 2014б. С. 87–115.

36. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Многолетние изменения основных метеорологических характеристик в бассейне Амура // Использование и охрана природных ресурсов в России. №4 (148), 2016а. С. 50–61.

37. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Климатические изменения в Приаралье и Средней Азии // Аридные экосистемы. 2016б. Т. 22. №4(69). С. 5–20.

38. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е., Каримова Т.Ю. Воздействие основных тенденций совокупного влияния климатических и гидрологических изменений на сукцессионную динамику растительности в мелиоративно трансформируемых экосистемах зоны южной тайги // Материалы Международной практической конференции «Современные проблемы использования мелиорированных земель и повышения их плодородия», г. Тверь, 27–28 июня 2013 г. Тверь. 2013. С. 246–252.

39. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е., Каримова Т.Ю. Динамические изменения наземных экосистем поймы и дельты Нижней Волги под влиянием зарегулирования речного стока и климатических флуктуаций // Аридные экосистемы. Т. 21, №4(65), 2015а. С. 39–53.

40. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е., Каримова Т.Ю. Критерии климатического и антропогенного заболачивания наземных экосистем в долинах рек // Болота и биосфера: материалы Всероссийской с международным участием IX школы молодых ученых (14–18 сентября 2015 г., г. Владимир). Иваново: ПресСто. 2015б. С. 219–224.

41. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2005. 463 с.

42. Неронов В.М., Кузьмина Ж.В. Об охране генофонда эндемичных видов флоры Монголии // Проблемы освоения пустынь. №5, 1989. С. 45–51.

43. Назаренко О.Г. Современные процессы развития локальных гидроморфных комплексов в степных агроландшафтах. Автореф. дисс. доктора биол. наук. М.: МГУ, 2002. 46 с.

44. Новикова Н.М., Волкова Н.А., Назаренко О.Г. К методике изучения и оценки воздействия водохранилищ на природные комплексы побережий // Аридные экосистемы. Т. 21, №4 (65), 2015. С. 84–94.

45. Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Шаповалова И.Б., Вышивкин А.А. Изучение водородных процессов в биоте степной зоны // Актуальная биогеография. Вопросы географии / Отв. ред. С.М. Малхазова, Е.Г. Мяло, Н.М. Новикова, Н.Б. Леонова. Вып. 134. М: Издательский дом «Кодекс», 2012. С. 265–297.

46. Новикова Н.М., Давыдова Н.С. Гидрохимический режим прудов при их разном использовании на территории Воронежской области // Вода: химия и экология. №4, 2010. С. 2–8.

47. Новикова Н.М., Кузьмина Ж.В. Мониторинг ландшафтно-экологических процессов в дельте Амударьи: по результатам исследований на муйнакской международной станции // Аридные экосистемы. Т. 6, №13, 2000. С. 23–36.

48. Новикова Н.М., Кузьмина Ж.В., Подольский С.А., Балюк Т.В. Критерии, ограничивающие регулирование режима речного стока по экологическим показателям // Аридные экосистемы. Т. 11, №28, 2005. С. 26–38.

49. Новикова Н.М., Кузьмина Ж.В., Шумова Н.А., Кутузов А.В. Опасность изменения грунтовых вод и подтопления земель // Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Южного федерального округа Российской Федерации. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2007. С. 240–245.

50. Новикова Н.М., Назаренко О.Г. Современный гидроморфизм: процессы, формы проявления, признаки // Аридные экосистемы. Т. 13, №33–34, 2007. С. 68–80.

51. Новикова Н.М., Назаренко О.Г. Природные комплексы побережий искусственных водоёмов на юге европейской части России // Аридные экосистемы. Т. 19, №3, 2013. С. 35–62.

52. Новикова Н.М., Назаренко О.Г., Волкова Н.А. Методика оценки водородной трансформации природных комплексов побережий водохранилищ // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1, №2, 2017. С. 21–51 (<http://www.ecosystemsdynamic.ru>).

53. Новикова Н.М., Уланова С.С. Эколого-географическая оценка искусственных водоёмов Калмыкии и экотонных систем «вода–суша» на их побережьях // Проблемы региональной экологии. №2, 2008. С. 33–39.

54. Новикова Н.М., Шафрот П.Б. Проблема сохранения природного биоразнообразия в условиях регулирования речного стока на западе США // Материалы МЦ РГО. Биогеография. Вып. 13. Москва: РАСХН, 2007. С. 88–100.

55. Оценка влияния изменения режима вод суши на наземные экосистемы / Отв. ред. Н.М. Новикова. М.: Наука, 2005. 365 с.

56. Панкова Е.И., Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. Влияние грунтовых вод на состояние почвенного и растительного покрова в оазисах Южной Гоби Монголии и перспективы рационального использования земель // Водные ресурсы. 21., №3, 1994. С. 358–364.

57. Панкова Е.И., Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. Состояние тугайной растительности в оазисах Южной Монголии и перспективы их восстановления // Аридные экосистемы. Т. 2, №2–3. М., 1996. С. 131–144.

58. Педь Д.А. О показателях засухи и избыточного увлажнения // Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 156, 1975. С. 19–39.

59. Переведенцев Ю.П., Исмагилов Н.В., Шерстюков Б.Г., Наумов Э. П., Шанталинский К.М., Гоголь Ф.В. Современные изменения климата республики Татарстан // Вестник ВГУ. Серия: География, Геоэкология. №2, 2008. С. 13–23.

60. Подольский С.А., Дарман Ю.А., Колобаев Н.Н. Динамика популяций копытных животных // Влияние Зейского водохранилища на наземных позвоночных. Благовещенск, 2000. С. 124–152.

61. Подольский С.А., Игнатенко С.Ю., Игнатенко Е.В., Тиунова Т.М., Павлова К.П., Коцюк Д.В., Антонов А.И., Михеев П.Б., Шмигрилов А.П., Борисова И.Г., Старченко В.М. Методология организации и ведения мониторинга биоразнообразия в зонах влияния ГЭС на примере крупных гидроузлов Приамурья // Вестник Дальневосточного отделения РАН. №1 (185), 2016а. С. 15–25.

62. Подольский С.А., Левик Л.Ю., Павлова К.П., Красикова Е.К. Редкие и краеарейные виды грызунов бассейна р. Зеи в условиях влияния гидростроительства // Амурский зоологический журнал VIII (2). 2016б. С. 154–167.

63. Подольский С.А., Кастрикин В.А., Париков М.П., Павлова К.П., Левик Л.Ю. Возможности сравнительной оценки обобщенных показателей видового разнообразия и численности животного населения на примере зоны влияния проектируемого Нижне Зейского гидроузла // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1, №1, 2017. С. 55–73 (<http://www.ecosystemsdynamic.ru>).

64. Природные комплексы побережья Цимлянского водохранилища / Под ред. Н.М. Новикова. М.: Агронаучсервис, 2014. 152 с.

65. Селянинов Г.Т. К методике сельскохозяйственной климатографии // Труды по с.-х. метеорологии. Т. 22. Л.: Издательство Отдела с.-х. метеорологии Гос. ин-та опытной агрономии, 1930.

66. Трешкин С.Е., Кузьмина Ж.В. Восстановление деградированных земель Приаралья в условиях изменения климата // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. №1, 2010. С. 79–83.

67. Трешкин С.Е., Кузьмина Ж.В. Структура древесно-кустарниковых тугаев низовьев Амударьи // Вестник КК ФАН УзССР. №4, Нукус, 1989. С. 35–39.

68. Трешкин С.Е., Кузьмина Ж.В. Современное состояние пойменных лесных экосистем рек Амударьи и Сумбара в связи с антропогенным

воздействием // Проблемы освоения пустынь. №2. Ашхабад, 1993. С. 14–19.

69. Цыганов А.Н., Новенко Е.Ю., Бабешко К.В., Мазей Н.Г., Борисова Т.В., Мазей Ю.А. Реконструкция послепожарной сукцессии болотных экосистем по данным палеоэкологического анализа // Сборник трудов конференции. Современные концепции экологии биосистем и их роль в решении проблем сохранения природы и природопользования. Материалы Всероссийской (с международным участием) научной школы – конференции, посвященной 115-летию со дня рождения А.А. Уранова. 2016. С. 210–212.

70. Шаповалова И.Б. Орнитокомплексы побережий Цимлянского водохранилища // Аридные экосистемы. Т. 21, №4 (65), 2015. С. 95–105.

71. Шаповалова И.Б. Современное состояние орнитофауны искусственного водоёма Сарпа под влиянием водного и антропогенного факторов // Проблемы региональной экологии. №4, 2016. С. 38–45.

72. Шаповалова И.Б., Завьялов Е.В. Орнитокомплексы островов Волгоградского водохранилища: состав, структура и динамика. М.: РАСХН, 2009. 222 с.

73. Шумова Н.А. Исследование естественной водообеспеченности посевов в лесостепной и степной зонах // Метеорология и гидрология. №11, 2001. С. 79–89.

74. Шумова Н.А. Закономерности формирования водопотребления и водообеспеченности агроценозов в условиях юга Русской равнины. М.: Наука, 2010. 239 с.

75. Шумова Н.А. Влияние мульчирования на суммарное испарение полей яровой пшеницы на юге Русской равнины // Метеорология и гидрология. №2, 2010. С. 82–91.

76. Шумова Н.А. Агрогидрологическая эффективность посевов яровой пшеницы по паровому предшественнику в лесостепной и степной зонах // Метеорология и гидрология. №6, 2012. С. 72–80.

77. Шумова Н.А. Анализ динамики разрушения берегов Цимлянского водохранилища // Аридные экосистемы. Т. 23, №3(73), 2017. (В печати).

78. Шумова Н.А. Прогноз и наблюдаемые смещения береговой линии Цимлянского водохранилища // Аридные экосистемы. Т. 19, №3 (56), 2013. С. 43–50.

79. Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: Изд-во «Перо», 2014. 399 с.

80. Экотонные системы «вода–суша»: методика исследований, структурно-функциональная организация и динамика / под ред. Н.М. Новиковой. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 272 с.

81. Duel H. Cyclic floodplain rejuvenation: a new strategy based on floodplain measures for both flood risk management and enhancement of the biodiversity of the river Rhine. NCR publication. 2001. Ph. 54–60.

82. Kouzmina J.V. Soil Salinization and floodplain Ecosystems of South-West Turkmenistan // Sabkha Ecosystems. Vol. 2. West and Central Asia / Ed. By M. Ajmal Khan et al. Springer science, 2006. Pp. 99–111.

83. Kouzmina J.V. The impact of natural and human-induced changes in the river flow and the climate on flood plain ecosystems in the middle Elbe river basin // *Ecological Engineering and Environment Protection*. №2, 2004. Pp. 5–15.

84. Kouzmina J., Treshkin S., Henrichfreise A. The Monitoring Comparative Results of the Floodplain Ecosystems in Regulated and Natural Part of the Danube River (Geisling-Passau) // *Korean Journal of Ecology*. Vol. 27, №4, 2004. Pp. 211–216.

85. Kouzmina J.V., Treshkin S.Y., Avetjan S.A., Henrichfreise A. Assessment of consequences change of river flow regime for floodplain ecosystems under building small and middle hydrotechnical constructions // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. Vol. 53, №1, Prague, Czech Republic, 2005. Pp. 3–16. (in english).

86. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.Ye. Phytomelioration of Solonchaks in the Uzbekistan Pre-Aral Region Under Recent Climate Change//*Aralkum – a Man-Made Desert. The Desiccated Floor of the Aral Sea (Central Asia)* / Eds. S-W. Breckle, W. Wucherer, L.A. Dimeeva, N.P. Ogar. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012. Pp. 407–429.

87. Kuz'mina Zh.V., Treshkin S.Y. Assesment of Effects of Discharged waters upon Ecosystems // *Ecology and Ecosystems*. Ed. By Igor S. Zektser. Springer science, 2006. (Part III Antropogenic Development, Geology and Ecosystems.) Pp. 149–160.

88. Lugo A., Brown S., Brinson M. Concepts in wetland ecology// *Forested wetlands*. New York: Elseiver. 1990. Pp. 53–85.

89. Novikova N.M., Aldjakova O.A. Ecosystem monitoring under desertification within interior sea-lakes and deltas/ *Geology and Ecosystems/* Ed. By Igor S. Zektser. Springer science, 2006. P. 281–294.

90. Novikova N.M., Kust G.S., Kuzmina J.V., Trofimova G.U., Dikariova T.V., Avetian S.A., Rozov S.U., Deruzhinskaya V.O., Safonicheva L. F., Lubeznov U.E. Contemporary plant and soil cover changes in the Amu-Dar'ya and Syr-Dar'ya river deltas // *Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas*. UNESCO: Paris. 1998. Pp. 55–80.

91. Novikova N.M., Kuz'mina Zh.V. Monitoring of the vegetation in conditions of the Aral Sea ecological crisis. M.: RAAS, 2008. 218 p.

92. Novikova N.M., Kuz'mina J.V., Dikareva T.V., Trofimova T.U. Preservation of the tugai biocomplex diversity within the Amu-Darya and Syr-Darya river deltas in aridization conditions // *Ecological research and monitoring of the Aral sea deltas*. Book 2. UNESCO: Printing Sagraphic, Barcelona. 2001. Pp. 155–188.

93. Shafroth P.B., Friedman J.M., Auble G.T., Scott M.L., Braatne J.H. Potential responses of riparian vegetation to dam removal // *BioScience*. Vol. 52, №8, 2002. August. Pp. 703–712.

94. Shumova N.A. Approach and evaluation of soil water resources in an arid region of the European steppe zone territory // *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. Vol. 48, №6, 2000. P. 381–398.

Качество вод бассейна реки Оки и степень их загрязнения

Р.Г. Джамалов, А.М. Никаноров, О.С. Решетняк, К. Г. Мягкова, Т.И. Сафронова

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект №17-05-00518

Введение

Река Ока – самый крупный правый приток реки Волги с площадью водосбора 245 тыс. км² и общей длиной 1500 км. Бассейн Оки расположен в центре Европейской части России и охватывает 16 административных субъектов Российской Федерации, включая г. Москву, несколько областных центров, сотни городов и посёлков городского типа, тысячи сельских населённых пунктов. Сток самой Оки можно считать условно естественным, так как только её приток река Москва зарегулирована гидротехническими сооружениями. В бассейне Оки насчитывается 19234 реки, из них 17618 (или 91,6 %) – малые реки с длиной менее 10 км. Средняя густота речной сети – 0,37 км/км², снижается до 0,2–0,3 км/км² на территории Мещёрской низменности (реки Пра, Гусь) и карстовых районах (реки Теша, Зуша) и возрастает до 0,5–0,6 км/км² в пределах Смоленско-Московской возвышенности (реки Воря, Пекша, Колокша). Имеет более 30 притоков, самые крупные из которых реки Клязьма, Москва, Угра, Мокша с притоком Цна. Водный режим отличается высоким весенним половодьем, летней и зимней меженью, осенними паводками. Питание Оки преимущественно снегодождевое, в зимний период – подземными водами [10].

Вся площадь бассейна располагается в умеренном климате. Годовая величина атмосферных осадков снижается с запада на восток от 750 мм до 650 мм. Твёрдые осадки в течение года составляют около 30%, жидкие – 70%. Такое соотношение связано с тем, что в условиях современных мягких зим и частых переходов температуры воздуха через 0°С наблюдается рост выпадений в виде дождя. Средняя интенсивность осадков за тёплый период составляет немногим более 1,6 мм/час. Однако в последние десятилетия продолжительность и частота выпадения слабых по интенсивности осадков уменьшается, а сильных и очень сильных растёт. Ливневые осадки с интенсивностью более 0,5 мм/мин могут вызвать максимальные расходы дождевых паводков и быстрое повышение уровней малых рек.

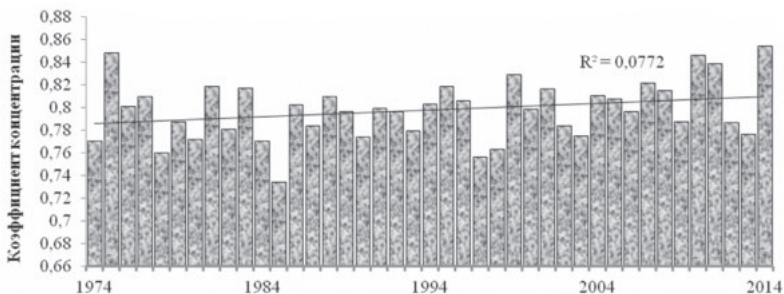


Рис. 1. Распределение коэффициента концентрации жидких осадков по метеостанциям в бассейне Оки

Рассмотрено, насколько неравномерно выпадают осадки в течение месяца в бассейне Оки с помощью так называемого коэффициента концентрации жидких осадков, т.е. насколько неравномерно в течение каждого месяца с апреля по октябрь выпадают осадки за период с 1974 по 2014 гг. Для этого сумму по месяцам тёплого периода делим на сумму среднемесячных величин осадков за этот период (рис. 1). Значение коэффициента концентрации, близкое к 1 означает, что все осадки выпадали в 1 день. Коэффициент концентрации осадков рассчитан как средневзвешенный по площадям метеостанций.

Динамика стока рек бассейна Оки

Речной сток в бассейне Оки постепенно возрастает за период инструментальных наблюдений. Среднее увеличение расходов воды за 1930–2012 гг. при аппроксимации многолетних колебаний линейным трендом составляет $40 \text{ м}^3/\text{с}$ за 10 лет. В ещё большей степени проявляются за этот период увеличение подземной составляющей общего стока – около $70 \text{ м}^3/\text{с}$ за 10 лет. Аналогичный характер колебаний прослеживается для подземной составляющей стока в лимитирующий месяц как в течение летне-осеннего (VI–X), так и зимнего (XI–III) периодов.

Наблюдениями на Валдайском стационаре ГПИ установлено, что разгрузка подземных бассейнов в реки носит пульсирующий характер. Это обусловлено тем, что гидравлический импульс инфильтрационного питания водоносного горизонта (в весенний и осенне-зимний сезоны) вызывает импульс поршневого вытеснения части

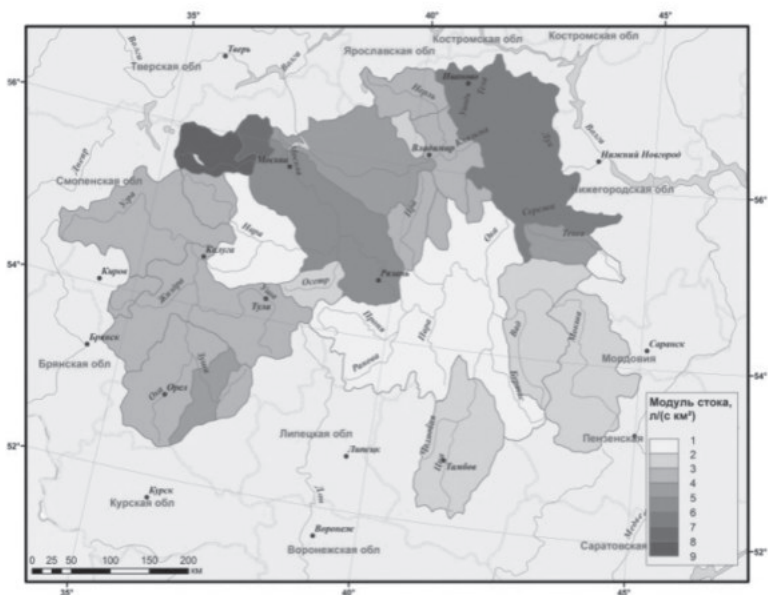
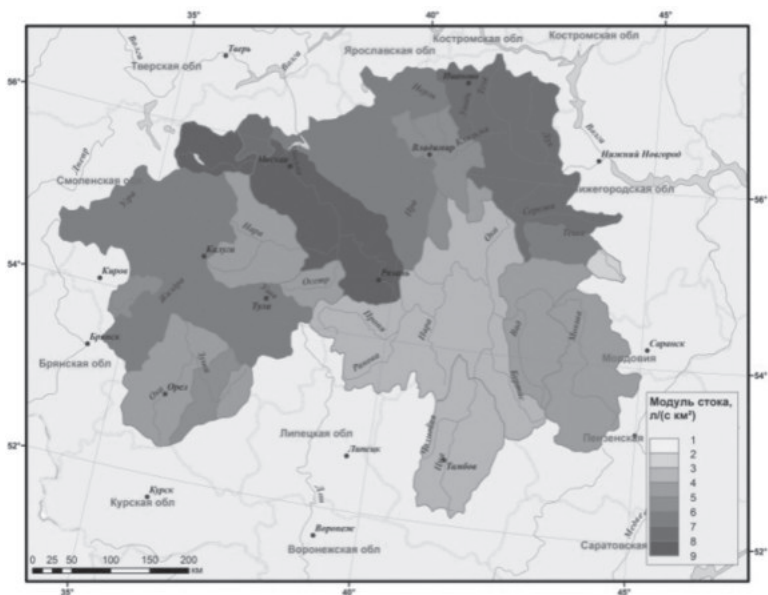


Рис. 2. Средние значения годового (а) и меженного (б) стока бассейна Оки (осреднённые за период 1978–2013 гг.)

подземных вод в реку. За счёт передачи гидростатического давления происходит волновое вытеснение порции «старой» воды при сохранении баланса между объёмами питания и разгрузки подземных и почвенных вод. Таким образом, изотопные, гидрохимические и другие виды детальных исследований показали, что порция инфильтрационного питания подземных вод сохраняется (аккумулируется) в водоносном горизонте или зоне аэрации на месяцы и годы и вытесняется в речную сеть очередными импульсами питания [11].

Непосредственные измерения степени участия различных генетических типов природных вод в формировании половодного и паводочного стока согласуются с особенностями формирования годового и сезонного стока под влиянием современных климатических условий. При этом различные по возрасту склоновый, почвенный и подземный стоки поступают в русловую сеть в импульсном режиме, что служит обоснованием наблюдаемых особенностей формирования сезонного стока. В частности, существенное увеличение зимнего стока обусловлено именно таким режимом разгрузки почвенных и подземных вод, которые получают дополнительное питание при частых оттепелях и слабом промерзании зоны аэрации [3; 9]. Следовательно, при подъёме и пике половодья в речном стоке преобладают поверхностно-склоновые и почвенно-грунтовые воды, на спаде половодья – почвенно-грунтовые, а в период летней и зимней межени – грунтовые.

Суммарный сток Оки закономерно снижается с северо-запада на юго-восток (рис. 2, а). В верхнем течении реки (до г. Калуга) они составляют 6–7 л/(с·км²), для водосборов малых притоков – до 5, а максимальные значения (7–9 л/(с·км²)) характерны для северной и северо-западной частей региона – бассейнов рек Москвы, Нерли, Клязьмы. Правобережные притоки нижнего течения Оки отличаются низкими значениями стока, составляя 4–5, а в бассейне Цны до 3–4 л/(с·км²).

Распределение меженного (подземного) стока в Окском бассейне носит неравномерный характер (рис. 2, б). Наиболее высокие его значения характерны нижнему течению Оки (от г. Касимов до г. Горбатов), бассейнам рек Москва и Клязьма, где модули стока достигает 7–8 л/(с·км²). Наименьшими значениями подземного

Таблица 1

**Водные ресурсы в бассейне Оки и их изменение за 1946–2013 гг.
(р. Ока – г. Горбатов)**

Период	Показатель	W, км ³ /год	W _{подз} , км ³ /год	W мин. месячный, км ³ /год	
				зима	лето–осень
1946–1977	Среднее	36,5	20,2	14,5	16,6
	Cv	0,22	0,21	0,24	0,23
1978–2013	Среднее	43,1	29,4	24,3	23,8
	Cv	0,18	0,15	0,21	0,18
Изменение, %		18	46	67	43
F-критерий Фишера		0,97	1,10	2,20	1,29
t-критерий Стьюдента		-3,54	-9,02	-9,30	-7,46

стока обладает юго-восточная часть бассейна, где модули снижаются до 2–3 л/(с·км²), а в бассейнах рек Вада и Мокша – до 1–2 л/(с·км²). На участках с минимальными модулями подземного стока наблюдается их увеличение до 100%. Для остальных рек прирост величин меженного стока составляет около 50–70%, снижаясь на участках от г. Калуга до г. Кашира и от с. Половское до г. Касимов до 15–20%.

Доля подземного стока в суммарном стоке бассейна Оки меняется от 0,3 до 0,7, составляя в среднем около 0,4–0,6. Изменение этого соотношения наилучшим образом иллюстрирует всё возрастающую роль естественных ресурсов подземного стока в суммарных водных ресурсах региона (табл. 1). Согласно выполненным расчётам современные суммарные водные ресурсы в бассейне Оки составляют 43,1 км³/год, причём за 1976–2013 гг. они возросли в среднем на 18%. При этом 29,4 км³/год (около 70%) составляют ресурсы подземных вод [9]. Наибольшая водность для большинства рек бассейна наблюдалась в 1994 г. и составляла 100–171% от средней многолетней, а наименьшая водность в 2011 г. 58–80% от средних значений.

**Химический состав речных вод
и их загрязнение**

Изменчивость химического состава воды Оки за период 2000–13 гг. рассмотрена по таким показателям, как растворённый в воде кислород, хлориды, сульфаты, азот аммонийный, азот нитритный, азот нитратный, соединения железа (общего), меди, цинка, никеля, фенолы летучие, нефтепродукты, легкоокисляемые органические вещества (по БПК₅) и трудноокисляемые органические вещества (по ХПК).

Оценка многолетней динамики качества воды и степени её загрязнённости проведена на основе сочетания дифференцированного и комплексного способов оценки. Комплексная оценка позволяет судить о гидрохимическом состоянии водной среды по ряду показателей качества воды и классифицировать степень её загрязнённости при антропогенной нагрузке. К наиболее информативным комплексным показателям качества воды относятся [4]: удельный комбинаторный индекс загрязнённости воды (УКИЗВ); класс качества воды (ККВ).

Значение УКИЗВ изменяются в зависимости от степени загрязнённости вод от 1 до 16. Большему значению индекса соответствует худшее качество воды. При оценке комплексного показателя оптимальное число учитываемых ингредиентов составляет от 10 до 25. Поэтому этот метод позволяет оценить и классифицировать загрязнённость воды по широкому спектру ингредиентов и показателей её качества. Обычно в качестве норматива используют ПДК вредных веществ для водных объектов рыбохозяйственного, хозяйственно-питьевого или культурно-бытового водопользования, т.е. методической основой комплексного способа служит оценка степени загрязнённости воды по совокупности ЗВ с выделением из них так называемых характерных ЗВ, частота превышения ПДК которых более 50% случаев. Основа дифференцированного способа – оценка качества воды водных объектов по отдельным загрязняющим веществам с использованием их ПДК и статистических методов.

Классификация качества воды, проведённая на основе значений УКИЗВ, позволяет разделять поверхностные воды на 5 классов в зависимости от степени их загрязнённости: 1-й класс – условно чистая; 2-й класс – слабо загрязнённая; 3-й класс – загрязнённая; 4-й класс – грязная; 5-й класс – экстремально грязная [4].

Смена генетических составляющих водного стока, гидрологических фаз и водности рек вызывает изменения минерализации и химического состава вод. В зависимости от ландшафтно-климатических условий водосборов рек и состава водовмещающих пород водоносных горизонтов в бассейне выделяются участки рек с очень малой минерализацией (менее 100 мг/дм³), малой минерализацией (100–200), средней минерализацией (200–500), повышенной минера-

лизацией (сумма ионов 500–1000) и высокой минерализацией воды (свыше 1000 мг/дм³) за счёт питания подземными водами из карбонатных пород и существенного загрязнения [5].

Гидрохимический режим рек бассейна Оки характеризуется естественными колебаниями во времени химического состава и отдельных его компонентов и веществ. Наряду с этим, современные особенности гидрохимического режима проявляются в колебании уровня загрязнённости воды различными ингредиентами, характеризующими как процессы антропогенного загрязнения, так и самоочищения водных объектов по обобщённым показателям качества и свойств речной воды.

Минерализация воды самой Оки от истоков до г. Муром не выше 260–600 мг/дм³ и только на отдельных участках ближе к низовьям достигает 700–800 мг/дм³. По составу вода гидрокарбонатно-кальциевая. По течению реки содержание гидрокарбонатных ионов постепенно уменьшается, а сульфатных ионов возрастает, особенно в меженный зимний и летний периоды с декабря по март и с июня по сентябрь. Минимальные величины минерализации воды возросли за последние десятилетия со 120 мг/дм³ в 1991–2001 гг. до 510 мг/дм³ в 2009–2011 гг., что может быть связано с маловодьем последних лет и возросшей степенью загрязнения. Кроме того, речные воды при высоких паводках и половодье обогащаются органическими кислотами, что увеличивает их цветность, снижает рН и уменьшает содержание гидрокарбонатов. В межень вода рек вновь приобретает гидрокарбонатно-кальциевый состав. Подобное влияние на состав природных факторов, конечно, не исключает антропогенное воздействие на гидрохимический режим речных вод и их загрязнение. При этом химические показатели позволяют охарактеризовать не только качество вод, но и установить степень загрязнённости воды, выявить источники загрязнения, определить соответствие воды требованиям конкретных водопользователей [6; 7].

Химический состав воды Оки изменяется вниз по течению, что можно проследить по трём характерным участкам: первый – от истока до устья реки Угры, второй – от устья Угры до г. Муром и третий – ниже г. Муром до устья. Первый участок в верховьях Оки отличается значительным влиянием на химический состав речной воды подземных вод карбонатных отложений девона из-за глубоких

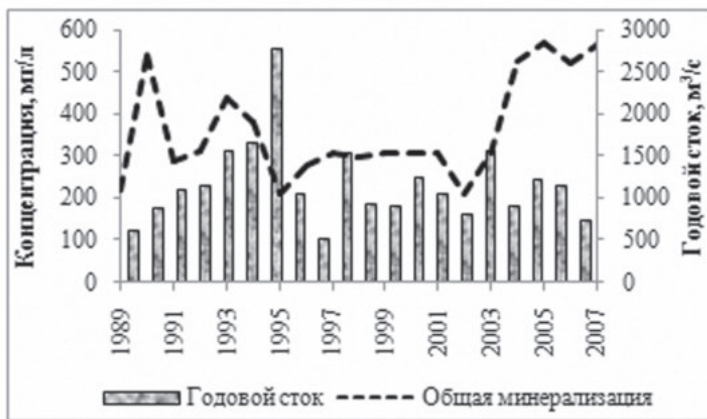
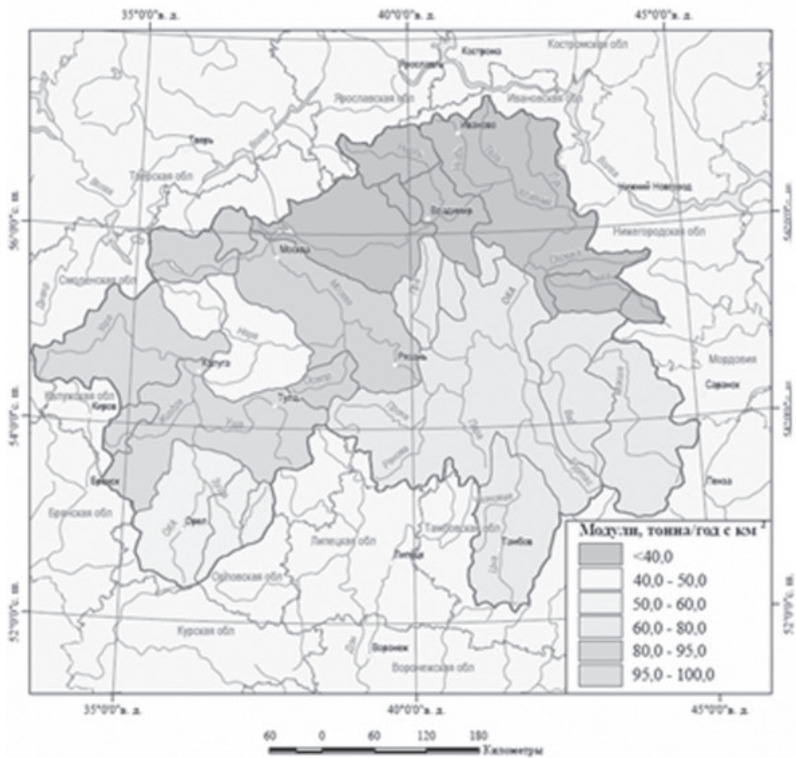


Рис. 3. Карта-схема распределения минерализации речных вод и график временной динамики изменений этого показателя по течению реки [10]

врезов речных долин. Поэтому активное дренирование известняков обуславливает здесь значительную минерализацию речных вод. На втором участке сначала происходит снижение минерализации под влиянием вод чистых рек Угры, Протвы, Нары и др., но ниже по течению, после впадения загрязнённых вод рек Москвы, Протвы, Мокши, наблюдается постепенное её увеличение (до 600 мг/дм³). Третий участок отличается повышением общей минерализации (до 700–800 мг/дм³) под влиянием близко залегающих в этой части бассейна отложений карбонатных пород с гипсом пермской системы. В связи с ростом минерализации воды ниже г. Муром в годы низкой водности (примерно с 2007 г.) содержание в ней сульфатов превышало 100 мг/дм³, достигая иногда 180–265 мг/дм³. Повышенная минерализация вод и обогащение их сульфатами, а также соединениями железа, марганца, меди и гумусовых веществ в основном обусловлено широким развитием карбонатных пород и заболоченностью водосборов самой Оки и её притоков [7].

Минерализация воды сравнительно мало изменяется по течению реки и в период пика половодья составляет 80–120 мг/л, в летний период повышается до 200–500 мг/л, а в период зимней межени возрастает до 450–570 мг/л. По химическому составу речные воды за анализируемый многолетний период сохраняют гидрокарбонатно-кальциевый состав. Однако вниз по течению реки относительное содержание гидрокарбонатных ионов постепенно уменьшается и увеличивается количество сульфатных ионов [7].

Содержание в воде хлоридов, сульфатов, азота нитратного и никеля не превышают ПДК во всех пунктах наблюдений. Постоянное или периодическое превышение ПДК по остальным показателям рассмотрено для каждого выделенного участка реки.

Верхнее течение реки. Выше и ниже г. Орёл превышение ПДК наблюдается по среднегодовым концентрациям: ХПК – в 1,1–1,7 раза, БПК₅ – 1,2–1,6 раза, азоту аммонийному – 1,1–1,25, азоту нитритному – 1,2–1,65, соединениям меди – 2,0–4,0, нефтепродуктам – в 1,1–1,4 раза. В значениях концентраций наблюдаются незначительные колебания. Постоянное ежегодное превышение ПДК отмечено только по содержанию органических веществ и соединениям меди. При этом концентрации всех веществ ниже города превышают их содержание выше города.

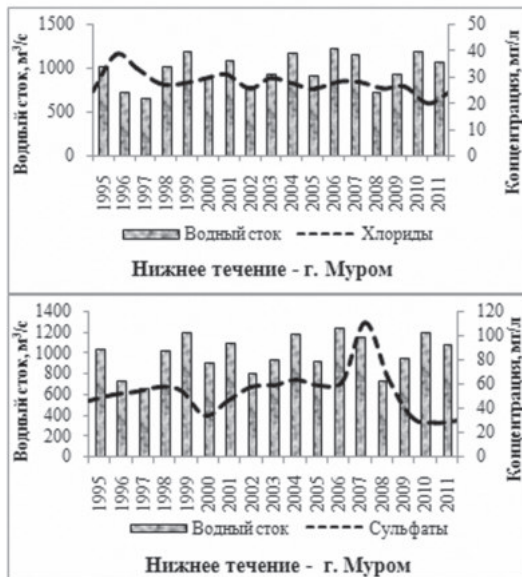
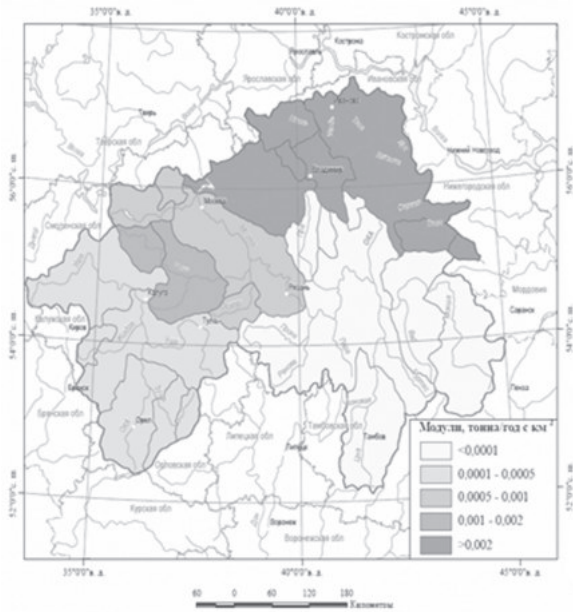


Рис. 4. Пространственно-временная динамика изменений растворённых солей сульфатов и хлоридов в бассейне р. Ока [7;10]

Как уже отмечалось гидрохимический состав воды преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый. Однако с увеличением подземной составляющей речного стока в меженный период начинает преобладать сульфаты, а концентрация хлоридов меняется незначительно и зависит в основном от антропогенных факторов (рис. 4).

Среднее течение реки. В створах выше и ниже г. Коломна наблюдается незначительное превышение ПДК по среднегодовым концентрациям: ХПК – в 1,5–2,0 раза, БПК₅ – 1,1–2,25, азоту аммонийному – в 1,5–3,3, соединениям железа – 1,3–3,0, соединениям никеля – 1,2–3,8, нефтепродуктам – в 1,2–2,4 раза. Периодические многократные превышения ПДК отмечены для азота нитритного – 1,5–5,0 раз, фенолов – 2,0–5,0 и соединений меди – 2,0–6,0 раз. Вода ниже города более загрязнена по всем ингредиентам и показателям.

Нижнее течение реки. В створах выше и ниже г. Дзержинск превышение ПДК наблюдается по среднегодовым концентрациям: ХПК – в 1,8–2,2 раза; БПК₅ – в 1,1–1,8, сульфатам – 1,4–1,7, азоту аммонийному – в 1,1–1,9, азоту нитритному – в 1,1–3,4, соединениям железа – в 1,1–2,1, соединениям меди – в 3,0–7,0, соединениям цинка – в 1,3–2,1 раза. Существенных различий в кратности превышения ПДК выше и ниже города не наблюдается.

Следует особо отметить повышенное содержание железа общего практически на всём протяжении реки Оки и её притоков, что обусловлено природными заболоченными ландшафтами территорий формирования стока (рис. 5).

Изменчивость качества воды

Качество воды обычно характеризуется физическими, химическими и бактериологическими свойствами и оказывает влияние на окружающую среду и человека. Вместе с тем, важным показателем состояния водной среды служит не только её качество, но и степень загрязнённости. Поэтому динамика химического состава и качества воды на различных участках реки заслуживает особого внимания.

Анализ многолетней гидрохимической информации выявляет определённые тенденции в динамике степени загрязнённости воды с 2000 по 2013 гг. Наименее загрязнено верхнее течение реки. Однако за многолетний период в районе г. Орёл качество воды измени-

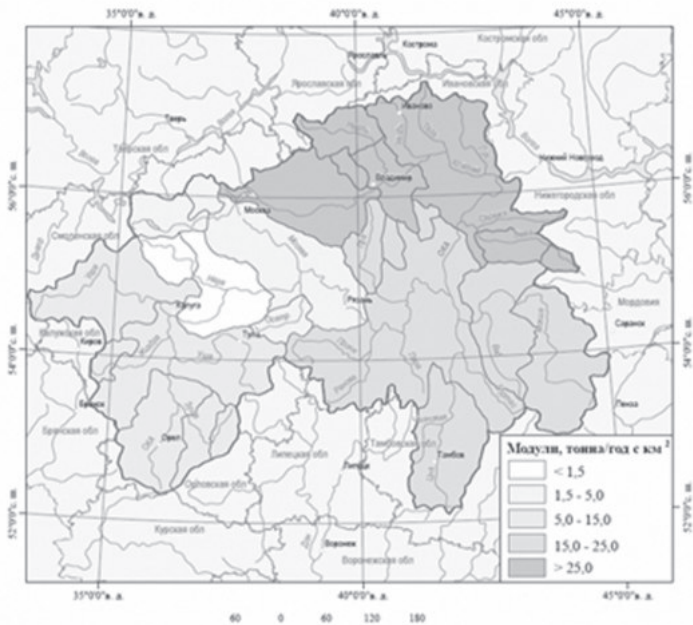


Рис. 5. Карта распределения содержания общего железа в бассейне р. Ока и график его временной динамики в створе г. Муром [7; 10]

лось от «слабо загрязнённой» (2-й класс) до «очень загрязнённой» (3-й класс, разряд «б»). Характерными загрязняющими веществами, частота превышения ПДК которых более 50% случаев, в этом случае

Характеристика качества воды на различных участках реки Оки
(2000–2013 гг.) [2]

Пункт наблюдений	Характерные загрязняющие вещества			
	2003 г.	2005 г.	2010 г.	2013 г.
г. Орел	Cu, NO ₂ , NH ₄ , ЛООВ	Cu, NO ₂ , ЛООВ	Cu, NO ₂ , ЛООВ, PO ₄	Cu, NO ₂ , ЛООВ, ТООВ
г. Коломна	Cu, Fe, NO ₂ , NH ₄ , ЛООВ, НФПР, фенолы	Cu, Fe, NH ₄ , NO ₂ , ЛООВ, фенолы, НФПР	Cu, NO ₂ , NH ₄ , ЛООВ, фенолы, НФПР	Cu, NO ₂ , NH ₄ , ЛООВ, ТООВ
г. Дзержинск	Cu, Fe, NO ₂ , NH ₄ , НФПР, ЛООВ	Cu, NH ₄ , ЛООВ	Cu, NO ₂ , ЛООВ, ТООВ	Cu, NO ₂ , ЛООВ, ТООВ

служили медь, азот нитритный, органические вещества (по показателям БПК₅ и ХПК).

Далее по течению реки качество воды ухудшается и у г. Коломна характеризуется как «грязная» (4-й класс, разряд «а, б»). При этом происходит увеличение количества характерных загрязняющих веществ за счёт фенолов, трудноокисляемых органических веществ и соединений железа. Это наиболее загрязнённый участок реки, поскольку в среднем течении Ока протекает по Московской области и испытывает высокую антропогенную нагрузку (демографическую и техногенную). В нижнем течении реки у г. Дзержинск вода также характеризуется как «грязная» (4-й класс, разряд «а»), характерные загрязняющие вещества – соединения меди, азот нитритный и аммонийный, трудно- и легкоокисляемые органические вещества (табл. 2) [8].

Изменчивость качества воды за более длительный период показывает, что в целом для реки Оки приоритетными ЗВ служат соединения меди, цинка, свинца, органических веществ (по БПК₅), азот нитритный с повторяемостью превышений ПДК 56–100%. Среди ЗВ преобладает медь со среднегодовым содержанием 4 ПДК, цинк, азот нитритный и аммонийный, органические вещества (ОВ) со среднегодовыми концентрациями 1–1,6 ПДК (по БПК₅). При этом максимальные концентрации достигали по соединениям меди – 8 ПДК, азоту нитритному – 7 ПДК, соединениям цинка – 4 ПДК, азоту аммонийному, нефтепродуктам – 3 ПДК, сульфатам, ОВ (по БПК₅), соединениям железа, марганца, свинца, фенолам – 1,3–

2 ПДК. В устье Оки максимальная концентрация соединений меди достигает 15 ПДК, цинка – 9 ПДК, азота аммонийного, азота нитритного, соединения железа, марганца – 4 ПДК, органических веществ (по БПК₅) и нефтепродуктов – 3 ПДК, сульфатов – 2 ПДК, свинца – 1,8 ПДК, никеля – 1 ПДК [7].

Качество воды в бассейне Оки варьирует от 3 класса «загрязнённая» до 4 класса «грязная». Однако резких изменений в динамике показателей качества речных вод не установлено. От истока к устью наблюдается некоторое ухудшение качества воды в соответствии с увеличением УКИЗВ, но направленных тенденций в многолетнем изменении УКИЗВ и ККВ не выявлено. Загрязнение поверхностных вод бассейна Оки связано с повышенным содержанием соединений азота, фосфора, органических веществ (по БПК₅ и ХПК). Повышенное содержание указанных и прежде всего биогенных элементов в водах малых и средних рек бассейна обычно обусловлено естественными условиями формирования речного стока и антропогенной нагрузкой промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

Проведена классификация качества воды отдельных участков реки Ока и её притоков на основании анализа и комплексной оценки уровня загрязнённости воды в последние десятилетия: верхнем течении реки характеризуется как «загрязнённая», но на территории Московской области и на участке от г. Рязань до устья как «грязная», а в отдельные годы как «загрязнённая». Динамика уровня загрязнённости воды в 2000-е гг. по сравнению с предыдущим десятилетием свидетельствует об улучшении качества воды в верхнем течении реки от «грязной» до «загрязнённой», но на территории Московской области и в нижнем течении в последние годы состояние воды ухудшается до «грязной» и «очень загрязнённой» [7].

Вода притоков Оки на территории Рязанской, Владимирской, Ивановской, Нижегородской областей и республики Мордовии характеризовалась как «грязная», реже как «загрязнённая». Качество воды рек Тамбовской области (река Цна и др.) снизилось до уровня «загрязнённой» и даже «грязной» под влиянием неочищенных сточных вод г. Тамбов. Низкое качество поверхностных вод бассейнов рек Москва и Клязьма обусловлено высокой антропогенной нагрузкой на речные экосистемы.

Несмотря на некоторое уменьшение в последние десятилетия сброса сточных вод, состояние качества воды отдельных рек бассейна остаётся напряжённым. Наиболее высокой степенью загрязнения отличается бассейн реки Москва за счёт влияния мегаполиса Москвы и других городов на берегах реки, общий объём сточных вод которых превышает среднегодовой сток [1].

Воды реки Москвы характеризуются сравнительно высокой степенью загрязнённости соединениями азота, фосфатами, органическими веществами (по БПК₅, ХПК), соединениями меди и железа. Содержание этих веществ в черте г. Москвы выше по сравнению с верхним течением. Ниже по течению (гг. Воскресенск – Коломна) загрязнённость воды несколько ниже, но достаточно высока. Внутригодовое распределение аммонийного и нитритного азота, ЛООВ, ХПК в верховьях реки Москвы колеблется в узком диапазоне концентраций, но ниже д. Нижнее Мячково вплоть до устья амплитуда колебаний этих веществ резко возрастает. По состоянию на 2011 г. резко увеличилось количество соединений азота (в 6–18 раз), фосфатов (в 3–9 раз), нефтепродуктов (до 3 раз). После сброса сточных вод г. Москвы максимальные концентрации этих ингредиентов отмечаются в летние месяцы и октябре–ноябре, минимальные – нитритно-гозотавапреде (0,110–0,140 мг/л), аммонийного – в августе (1,20–2,50 мг/л). Межсезонные колебания концентраций соединений железа наблюдаются по всему течению реки Москвы от минимальных значений в августе–сентябре (0,08–0,23 мг/л) до максимальных в декабре–январе (0,51–0,72 мг/л). В последнее десятилетие концентрации фосфатов выше норматива встречались до 100% отобранных проб, нитритного и аммонийного азота – до 70–90 и 25–50% соответственно [7].

На качество воды реки Клязьмы существенное влияние оказывают сточные воды Московской и Владимирской областей, объём которых только в 2011 г. составил 124,1 и 57,8 млн м³ соответственно. Такие загрязняющих веществ воды реки как аммонийный и нитритный азот, органические вещества (по БПК₅ и ХПК), соединения меди, железа, фенолы превышают ПДК от 3–5 до 1–2 в последние десятилетия. Вниз по реке наблюдается некоторое снижение среднегодового содержания ЗВ и сужается диапазон их внутригодового колебания. Однако в отдельные годы происходит рост случаев высокого загрязнения воды реки в Московской области нитритным азо-

том от 46 до 62%. За многолетний период превышение ПДК соединениями железа по длине реки происходит в 40–100% отобранных проб. Максимальные концентрации железа наблюдаются в районе г. Владимир до 3,54 мг/л. За многолетний период проявляется тенденция снижения содержания железа в воде реки. Загрязнённость фосфатами выше норматива также проявляется в течение последних десятилетий по всей длине реки, снижалась к устью. Наиболее высокий уровень содержания фосфатов характерен для реки ниже г. Щёлково, где сброс сточных вод города приводит к наиболее высокой загрязнённости воды. Здесь проявляет себя многолетний тренд увеличения концентраций соединений азота и ОВ [7].

Гидрохимическое состояние и загрязнение подземных вод

Подземные воды на территории бассейна по своему качеству не вполне соответствуют питьевым нормам. Наиболее часто превышение ПДК связано с ингредиентами природного происхождения – это, прежде всего, содержание железа и показателя общей жёсткости, а также на значительных площадях не соответствуют нормам концентрации фтора, стронция, кремния, марганца, лития, общей альфа-радиоактивности. Наряду с этим, в районах интенсивного водоотбора подземных вод за счёт изменения их гидродинамического режима происходит усиление растворения водовмещающих пород и подтягивание природных некондиционных вод. В районах развития региональных депрессионных воронок на территории Московской и Тульской областей и в районах областных центров (Воронеж, Калуга, Белгород, Курск и др.) наблюдаются повышенные, и даже высокие концентрации многих природных элементов.

Загрязнение подземных вод обычно связано с коммунальными, техногенными и сельскохозяйственными объектами. Масштабы и степень загрязнения в значительной степени зависят от региональной естественной защищённости подземных вод, связанной с присутствием в зоне аэрации и кровле эксплуатируемых горизонтов обогащённых органикой почв и слабопроницаемых глинистых отложений. В связи с этим техногенное загрязнение наблюдается, прежде всего, в верхних водоносных горизонтах четвертичного и неоген-четвертичного возрастов, особенно на участках без организации зон санитарной охраны.

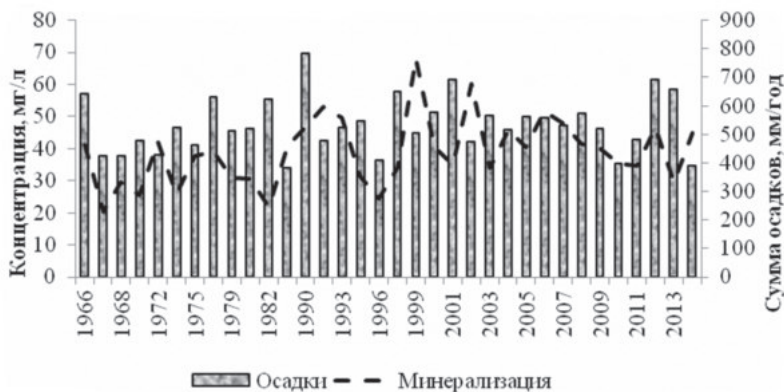


Рис. 6. Динамика минерализации подземных вод в пределах Рязанской области [12].

Загрязнения выявлены и в пределах других областей по результатам гидрохимического опробования водозаборов, они обычно носят очаговый характер. Загрязнение охватывает практически все эксплуатационные горизонты и связаны в основном с ЗВ из шламонакопителей, золоотвалов, нефтебаз, полигонов промтоходов (свыше 50% участков), а также с крупными птицеводческими и животноводческими комплексами (свыше 20% участков). С объектами коммунального хозяйства (полигоны ТБО, очистные сооружения, поля фильтрации и др.) связаны свыше 10% участков загрязнения. На территории бассейна основными ЗВ служат соединения азота (50%), нефтепродукты (8%), хлориды, сульфаты. Среди многочисленных водозаборов на подземные воды свыше 950 не соответствуют стандартам качества на питьевую воду, и это количество ежегодно возрастает. Большинство участков загрязнения подземных вод расположено на территории или вблизи крупных промышленных центров и установлено на территории Московской (280), Воронежской (122) и Курской (28) областей. Источники (15%), тяжёлые металлы (11%), фенолы (5%). Интенсивность загрязнения в большинстве случаев составляет 1–10 ПДК (свыше 53%), в пределах 10–100 ПДК (около 30%), для 15% участков ПДК превышают 100.

Только в Рязанской области более 3,5 тыс. скважин эксплуатируют подземные воды каменноугольных и девонских отложений. Качество подземных вод в основном соответствует питьевым стандартам. Однако в ряде водозаборов выявлено превышение норм

ПДК по железу общему, магнию, марганцу и цинку [12]. Кроме того, к распространённым ЗВ с превышением ПДК относятся также азотсодержащие соединения, что может говорить о загрязнении подземных вод ОВ. Со стоками промпредприятий в источники водоснабжения часто попадают тяжёлые металлы.

Заключение

Химический состав природных вод бассейна реки Оки в естественных условиях зависит от ландшафтно-климатических условий водосборов рек и состава водовмещающих пород водоносных горизонтов и помимо этого определяется сменой генетических составляющих водного стока, его гидрологических фаз и водности лет. Анализ многолетней динамики качества природных вод бассейна не выявил определённых тенденций. Верховья реки и её участки вблизи малонаселённых пунктов отличаются практическим отсутствием антропогенного загрязнения. Однако по мере роста населения и антропогенной нагрузки на водные объекты степень загрязнённости речных вод в большинстве пунктов наблюдений в последние годы характеризуется различными разрядами 3-го и 4-го класса качества, а в пределах больших экономически развитых городов даже 5 классом качества в отдельные годы.

Состояние качества воды отдельных рек бассейна остаётся напряжённым. Наиболее высокой степенью загрязнения отличаются бассейны рек Москва и Клязьма за счёт влияния мегаполиса Москвы и предприятий Московской и Владимирской областей, сточные воды которых превышает среднегодовой сток рек.

Проведена классификация качества воды отдельных участков Оки и её притоков на основании анализа и комплексной оценки уровня загрязнённости воды в последние десятилетия: верхнее течение реки характеризуется как «загрязнённая», но на территории Московской области и на участке от г. Рязань до устья – как «грязная». Пространственная изменчивость напрямую зависит от уровня антропогенной нагрузки на конкретный участок водотока, поэтому территория Московской области – нижнее течение – в последние годы состояние воды ухудшается до «грязной» и «очень загрязнённой».

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамова Е.А. Оценка уровня антропогенной нагрузки на бассейн реки Оки в пределах Московской области // Электронный журнал «Вестник Московского государственного областного университета», 2011. /2/ География. С. 20.
2. Гришанова Ю.С., Решетняк О.С. Оценка влияния крупного города на качество воды реки Ока (на примере г. Дзержинск) // Актуальные проблемы наук о Земле. Сб. тр. науч. конф. студ. и мол. учёных с межд. участием. Ростов-н/Д: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 335–337.
3. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. №3, 2015. С. 97–108.
4. Методические указания РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязнённости поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 49 с.
5. Никаноров А.М. Региональная гидрохимия. Ростов-н/Д: Изд-во «НОК», 2011. 388 с.
6. Никаноров А.М. Фундаментальные и прикладные проблемы гидрохимии и гидроэкологии. Ростов-н/Д: Изд-во ЮФУ, 2015. 735 с.
7. Никаноров А.М., Минина Л.И. и др. Динамика качества поверхностных вод крупных речных бассейнов Российской Федерации. Ростов-н/Д: Изд-во ГХИ, 2016. 294 с.
8. Решетняк О.С., Лямперт Н.А., Гришанова Ю.С. Пространственная изменчивость химического состава и качества воды р. Ока // Материалы научной конференции с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». Ростов-на-Дону, 2015. С. 278–282.
9. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: формирование, распределение, использование // Под ред. Р.Г. Джамалова, Н.Л. Фроловой. М.: ГЕОС. 2015. 320 с.
10. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Ока. Москва: Московско-Окское БВУ, 2010. 152 с.
11. Kirchner J.W. A double paradox in catchment hydrology and geochemistry // Hydrological Processes. V. 17., 2003. P. 871–874.
12. Геолого-гидрогеологические условия Рязанской области // Геоцентр-Москва URL: <http://geocentr-msk.ru/content/view/191> (дата обращения: 25.08.2016). Режим доступа: свободный.

АВТОРЫ СТАТЕЙ

АДЖИЕНКО Георгий Владиславович – младший научный сотрудник лаборатории охраны вод ИВП РАН. Область научных интересов – международное и национальное природоохранное законодательство, системы экологического менеджмента на предприятиях.

БАКАЕВА Елена Николаевна – известный специалист в области исследований антропогенных воздействий (загрязнения, закисления и др.) на водные объекты, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН. Широко известны результаты автора в области исследования внутриводоёмных химико-биологических процессов, влияния биогеохимических особенностей донных отложений на систему «вода – донные отложения – гидробионты».

БОЛГОВ Михаил Васильевич – ведущий отечественный специалист в области стохастической гидрологии, доктор технических наук, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод ИВП РАН.

Основные направления исследований связаны с изучением стохастических свойств гидрометеорологических процессов, сезонных и многолетних колебаний речного стока, экстремальных гидрологических ситуаций. Предложенные автором методы основаны как на классических результатах теории вероятности, так и на новых подходах к районированию гидрометеорологических характеристик, использующих сочетание географических и стохастических представлений об их однородности и изменчивости. Болговым выполнен цикл работ по экспериментальному изучению гидрологического режима и свойств почв на урбанизированных территориях, разработаны вероятностно-детерминированные методы прогноза подтопления территорий.

На основе разработанных Болговым методов и моделей предложены подходы к решению ряда актуальных научно-прикладных задач, таких как вероятностное прогнозирование уровня Каспийского моря и других замкнутых озёр; оценка надёжности функционирования Волжского каскада гидроузлов в условиях затяжных маловодий; водообеспечение атомных электростанций на основе схем комбинированного использования поверхностных и подземных вод. В настоящее время автором разрабатываются методы оценивания и прогнозирования гидрологического режима в условиях неопределённости климатических изменений, исследуются проблемы водопользования на трансграничных реках и др.

Болгов – член Национального комитета Российской Федерации по Международной гидрологической программе ЮНЕСКО, член Совместной Российско-Китайской комиссии по рациональному использованию и охране трансграничных вод, член экспертного совета при комитете Государственной думы по природным ресурсам и ряда других научно-технических и экспертных советов; член Учёного и Диссертационного советов Института, Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», член редколлегий журналов «Водные ресурсы», «Метеорология и гидрология» и др.

При участии Болгова разработана Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г. (утверждена Правительством РФ в 2009 г.) и проект Федеральной программы по модернизации водохозяйственного комплекса РФ.

По результатам исследований опубликовано (в соавторстве) более 150 научных работ, в том числе 5 монографий: Д.Я. Раткович, М.В. Болгов. «Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна». М., ИВП РАН, 1997, 262 с.; М.В. Болгов, В.М. Мишон, Н.В. Сенцова. «Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения», М., Наука, 2005, 318 с.; М.В. Болгов, Г.Ф. Красножон, А.А. Любушин. «Каспийское море. Экстремальные гидрологические события». М., Наука, 2007, 381 с.; М.В. Болгов, И.О. Сарманов, О.В. Сарманов. «Марковские процессы в гидрологии», М., ИВП РАН, 2009, 210 с.; М.В. Болгов, Е.А. Коробкина, Н.В. Осипова. «Предотвращение катастрофических паводков и обеспечение безопасности территории Крымского района Краснодарского края». М., ИВП РАН, 2013, 34 с.

БРЕЗГУНОВ Вячеслав Сергеевич – специалист в области изотопных методов исследования природных вод, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. Основные направления деятельности связаны с развитием экспериментальных и теоретических методов исследования водообмена с помощью природных изотопных индикаторов. Автор около 100 печатных работ.

БРЕХОВСКИХ Вадим Феодосьевич – ведущий отечественный специалист в области гидрофизики и тепло- и массопереноса в водных объектах, доктор технических наук, профессор, руководитель группы внутриводоемных процессов ИВП РАН. Научная деятельность посвящена исследованию процессов переноса растворённых и взвешенных веществ в водных объектах, теоретическому и экспериментальному изучению связи гидрологического и кислородного режимов рек, испытываю-

щих большую антропогенную нагрузку. Большое место в работах Бреховских занимают исследования процессов распространения загрязняющих веществ, попадающих в реки и водоёмы в результате аварийных сбросов. Особое внимание уделяется исследованиям процессов переноса примесей на границе «вода – донные отложения»: накопление и вынос из донных отложений биогенных и токсичных веществ, вопросы вторичного загрязнения водных масс при взмучивании донных отложений под воздействием природных и антропогенных факторов и др.

Под руководством и при личном участии Бреховских выполнен цикл оригинальных экспериментальных работ и расчётов по изучению роли гидробионтов в процессах переноса растворённых и взвешенных веществ в воде и донных отложениях, в частности влияния макробентоса на размыв связанных грунтов.

Под руководством Бреховских подготовлено 5 кандидатов наук. Член Учёного совета Института, Диссертационного совета при ИВП РАН, Научного совета Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши». Награждён Почётной грамотой Российской академии наук и Профсоюза работников Российской академии наук.

Автор и соавтор более 200 научных трудов, в том числе 6 монографий: Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоёмов. М., Наука. 1988, 168 с.; Ивановское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны М., Наука 2000. 344с. (Абакумов В.А., Ахметьева Н.П., Бреховских В.Ф. и др.); Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Колесниченко Н.Н. Проблемы качества поверхностных вод в бассейне Северной Двины. М., Наука, 2003, 233 с.; Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. Зарастающие водотоки и водоёмы. Динамические процессы формирования донных отложений М., Наука, 2004, 310 с.; Бреховских В.Ф., Казмирук Т.Н., Казмирук В.Д. Донные отложения Ивановского водохранилища: состояние, состав, свойства. М., Наука, 2006, 176 с.; Бреховских В.Ф., Казмирук В.Д., Вишневецкая Г.Н. Биота в процессах массопереноса в водных объектах. М., Наука, 2008. 315 с.

БУХАРИЦЫН Пётр Иванович – ведущий отечественный специалист в области гидрологии Каспийского моря и устьевых областей, доктор географических наук, профессор, руководитель группы исследований экологических проблем в дельте р. Волги ИВП РАН в г. Астрахань.

Область научных интересов – морская гидрофизика, ледовые процессы в реке и море, их расчёт и прогнозирование, авиационные и космические наблюдения за ледяным покровом, другими опасными природными явлениями, рациональное использование водных ресурсов, сохранение биологического разнообразия в регионе Каспийского моря и прилегающих территорий, общая и морская экология.

Под руководством и при непосредственном участии Бухарицына проводятся уникальные экспедиционные исследования слабоизученных гидрологических и ледовых процессов в Каспийском море. Результаты этих работ используются администрацией Астраханской области и другими организациями для повышения эффективности хозяйственной деятельности на российской части шельфа Каспийского моря, обеспечения безопасности судоходства по Волго-Каспийскому каналу и на Северном Каспии, при проведении рыбного промысла, морских нефтеразведочных работ и др.

Профессор кафедры «Инженерная экология и природообустройство» Астраханского государственного технического университета. Под его руководством защищено 5 кандидатских диссертаций.

Председатель Астраханского регионального отделения «Русского географического общества», имеет государственные и общественные награды (в т.ч. международные). Награждён медалью м. М.В. Ломоносова Международной академии наук по экологии и безопасности жизнедеятельности, удостоен почётных званий Всероссийского общества охраны природы и Российской академии естественных наук.

Автор и соавтор более 400 научных работ (в том числе 10 коллективных монографий и двух книг), 30 учебно-методических пособий, лекций, учебных видеофильмов по краеведению, опубликованных картографических работ (электронный атлас ледовых образований Каспийского моря; гидрологические карты в Географическом атласе Астраханской области).

В последние годы Бухарицыным опубликованы монографии: Бухарицын П.И., Болдырев Б.Ю., Новиков В.И. Система гидрометобеспечения безопасности мореплавания на Каспии. *Palmarium Academic Publ.*, 2015, 329 с.; Бухарицын П.И., Киен Нгуен Данг. Влияние температуры воды на состояние популяции и промысел тунца в ЮКМ. Прогнозирование вылова тунца в зависимости от океанологических и экономических факторов. *Lambert Academic Publ.*, 2015.

БАВИЛИН Василий Александрович – ведущий специалист в области математического моделирования микробиологичес-

ких процессов, доктор физико-математических наук, руководитель группы моделирования продукционно-деструкционных процессов ИВП РАН.

Всемирную известность получили работы Вавилина, связанные с изучением механизма автоколебательной химической реакции Белоусова-Жаботинского и периодической химической реакции Брея-Либавского, математического моделирования процессов биологической очистки сточных вод, анаэробных процессов. Под руководством Вавилина и при его непосредственном участии в середине 1990-х гг. была разработана первая компьютерная модель анаэробных процессов "МЕТАН" с дружественным интерфейсом. Для моделирования химического и биологического разложения твёрдых отходов созданы модели с распределёнными параметрами. Исследованы различные явления пространственной динамики во время деградации твёрдых бытовых отходов (значение центров инициации метаногенеза, отрицательные и положительные эффекты перемешивания раствора на скорость процесса, разложение эфиров фталевой кислоты в метаногенных условиях и т.д.). Получены новые результаты, описывающие перераспределение лёгких и тяжёлых изотопов в результате микробиологического разложения различных субстратов.

Член Международной ассоциации качества воды, Международной ассоциации по водным ресурсам, специализированной группы по моделированию анаэробных процессов Международной Водной Ассоциации, член Российской академии естественных наук, член Учёного совета Института и Диссертационных советов при ИВП РАН и Физическом факультете МГУ.

Автор и соавтор более 110 статей в реферируемых журналах, 5 монографий: Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической обработки сточных вод активированным илом. М., Наука, 1979, 119 с.; Вавилин В.А. Нелинейные модели биологической очистки сточных вод и процессов самоочищения рек. М., Наука, 1983. 159 с.; Вавилин В.А. Время оборота биомассы и деструкция органических веществ в системах биологической очистки. М., Наука, 1986. 144 с.; Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытов С.В. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов. М., Наука, 1993. 202 с.; Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S. V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H. and Vavilin V.A. "Anaerobic Digestion Model No.1." Scientific and Technical Report No.13. IWA Publishing, Cornwall, UK, 2002.

Вавилин – один из наиболее цитируемых в изданиях базы Web of Science отечественных специалистов в области математического моделирования микробиологических процессов. Входит в престижный список «Кто есть кто в Российской науке» <http://expertcorps.ru/science/whoiswho>, объединяющий учёных из всех областей науки, имеющих наибольшее число цитирований в базе Web of Science.

ВЕНИЦИАНОВ Евгений Викторович - ведущий отечественный специалист в области математического моделирования физико-химических процессов, теории мониторинга водных объектов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией охраны вод ИВП РАН.

Широкую известность получили результаты автора, связанные с анализом физико-химических процессов в водных объектах и существенно расширившие представление о процессах формирования и трансформации качества природных вод, возможности оптимизации водоохранных мероприятий на водных объектах. Им впервые разработан метод оптимизации системы водоохранных мероприятий в бассейне реки с учётом экологических требований и экономической эффективности. Предложен и запатентован интегрально-сорбционный метод мониторинга аварийных сбросов в водные объекты («Экологический полицейский»).

Большое внимание в работах Веницианова уделяется прикладным вопросам, связанным с системой водоохранных мероприятий в бассейне р. Волги, повышением эффективности функционирования водохозяйственной системы водоснабжения г. Москвы, оптимизации правил управления водохранилищами Москворецкой системы.

Веницианов ведёт большую педагогическую деятельность в Международном университете природы, общества и человека («Дубна») и в ИВП РАН, под его руководством защищено 5 кандидатских диссертаций.

Член Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», Учёного совета Института, диссертационных советов при ИВП РАН и биологическом факультете МГУ им М.В. Ломоносова; руководитель секции охраны вод Общественного совета по экологии при Департаменте природопользования Правительства Москвы, возглавляет Комитет по охране природы Московского союза научных и инженерных организаций, член Научно-технического совета МГУП «Мосводоканал».

Опубликовано около 200 научных работ, из них 7 монографий, в том числе: Веницианов Е.В., Комаров И.К., Коптева Е.Н. и др. Организационно-экономический механизм рационально-

го водопользования. / Научн. ред. И.К.Комаров. ИВП РАН и КЕПС РАН. Москва. Изд. «Вымпел». 1997. 300 с.; Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжёлых металлов в природных водах. Екатеринбург, Изд. РосНИИВХ, 2002, 236 с.; Веницианов Е.В., Винниченко В.Н., Гусева Т.В. и др. Экологический мониторинг: шаг за шагом. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003, 252 с.; Щеголькова Н.М., Веницианов Е.В. Охрана загрязненной реки: интенсификация самоочищения и оптимизация водоотведения. М., РАСХН, 2011, 388 с.

ВИШНЕВСКАЯ Галина Николаевна – специалист в области гидробиологии, кандидат физико-математических наук. Участвовала в выполнении цикла работ по изучению роли гидробионтов в процессах переноса растворённых и взвешенных веществ в воде и донных отложениях. Имеет более 70 научных работ.

ВОЛКОВА Зинаида Васильевна – специалист в области гидрологии, гидрофизики, гидрохимии, экологии, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. В последнее время занимается исследованиями состояния загрязнения вод и донных отложений Нижней Волги. Автор и соавтор более 100 научных трудов, в том числе 4 монографий.

ГЕЛЬФАН Александр Наумович – ведущий специалист в области математического моделирования гидрологических процессов в речных бассейнах, доктор физико-математических наук, заместитель директора ИВП РАН по научной работе.

Научные достижения Гельфана до начала 2000-х гг. тесно связаны с именем его учителя – профессора Л.С. Кучмента. В эти годы ими были выполнены пионерные и широко цитируемые за рубежом работы по физико-математическому моделированию накопления и таяния снега под пологом леса, инфильтрации воды в мёрзлую почву, разработаны методы ассимиляции спутниковых данных о снежном покрове в моделях формирования весеннего половодья, определения параметров физико-математических моделей при недостаточности гидрологических наблюдений, обоснована гипотеза самоподобия поля снежного покрова, и предложен основанный на этой гипотезе метод описания подсеточных эффектов в моделях гидрологического цикла.

Из научных результатов, полученных Гельфаном в последние годы, выделяются первые в мире исследования влияния внутренней стохастической изменчивости атмосферы на неопре-

делённость гидрологических проекций изменения климата, новый метод анализа и оценки предсказуемости гидрологических систем, методы анализа физических механизмов чувствительности экстремальных гидрологических явлений к изменениям климата, ансамблевого долгосрочного прогноза сезонного стока рек. Особое место в исследованиях автора занимает создание научных основ и разработке технологий информационной поддержки управления риском наводнений на основе физико-математических моделей формирования паводкового стока и гидродинамических моделей движения воды в руслах рек.

Заведующий кафедрой водных ресурсов ИВП РАН, в должности профессора читает курс лекций на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Под руководством Гельфана защищены 2 диссертации.

Член редколлегий журналов «Водные ресурсы», «Russian Journal of Earth Sciences», журналов Европейского союза геофизических наук: «Hydrology and Earth System Sciences» и «Earth System Science Data». Секретарь Комиссии по гидрологии снега и льда Международной Ассоциации Гидрологических Наук.

Автор более 100 научных работ, из них 2 монографии: Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М. Наука, 1993, 104 с.; Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М., Наука, 2007, 294 с.

Гельфан – один из наиболее цитируемых в изданиях базы Web of Science отечественных специалистов-гидрологов. Входит в престижный список «Кто есть кто в Российской науке» <http://expertcorps.ru/science/whoiswho>, объединяющий учёных из всех областей науки, имеющих наибольшее число цитирований в базе Web of Science.

Вся научная деятельность Гельфана, начиная с аспирантуры до настоящего времени, связана с Институтом водных проблем РАН.

ГРИЦУК Илья Игоревич – специалист в области изучения и моделирования транспорта наносов в подлёдных потоках, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

ГУСЕВ Евгений Михайлович – ведущий специалист в области изучения режима и ресурсов почвенных вод, моделирования процессов тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой, доктор биологических наук, заведующий лабораторией физики почвенных вод ИВП РАН.

Гусевым совместно с О.Н. Насоновой разработана наиболее известная в мире отечественная модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP – неизменный участник масштабных международных экспериментов по моделированию потоков тепла и влаги в системе «почва-растительность-атмосфера» (Man & Biosphere, PILPS, MOPEX, Rhona-AGG, GSWP, ALMIP, SnowMIP и других). В работах Гусева предложены новые методы оценки эффективности различных приёмов воздействия на режим почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова. Его работы внесли существенный вклад в развитие исследований А.И. Будаговского – основателя учения о почвенных водах. В настоящее время Гусевым совместно с О.Н. Насоновой разрабатывается комплекс сопряжённых гидрологических и климатических моделей формирования теплового и водного режимов системы «суша – атмосфера».

Результаты исследований Гусева отмечены многими профессиональными наградами, в их числе медаль Международного биографического центра (IBC) при Кембриджском Университете («IBC Cambridge Blue Book») в 2007 г., медаль «IBC Lifetime achievement award» в 2008 г.

Член Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», Учёного и Диссертационного советов ИВП РАН, Исследовательской коллегии советников Американского биографического института; редколлегии международного журнала «Journal of Hydrology and Hydromechanics».

Автор и соавтор более 200 публикаций, из них 3 монографии: Гусев Е.М. Формирование режима и ресурсов почвенных вод в зимне-весенний период. М., Наука, 1993, 158 с.; Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М., Наука, 2010, 328 с.; Гусев Е.М. Ресурсы почвенных вод и экология наземного растительного покрова. Концепции, эксперимент, расчёты. Saarbrücken. Palmarium Academic Publishing, 2012, 116 с.

В 2008 году за цикл работ, посвящённых исследованию влаго- и теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой и опубликованных в журналах издательства МАИК «НАУКА»/Интерпериодика, Е.М. Гусеву совместно с О.Н. Насоновой была присуждена Главная премия этого издательства.

Гусев наиболее цитируемый в изданиях базы Web of Science отечественный специалист в области исследования и моделирования тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. Входит в престижный список «Кто есть кто в Российской науке» <http://expertcorps.ru/science/whoiswho>, объединяю-

ций ученых из всех областей науки, имеющих наибольшее число цитирований в базе Web of Science.

ДАНИЛОВ-ДАНИЛЬЯН Виктор Иванович – всемирно известный специалист в области экономики природопользования, экономико-математического моделирования, теории устойчивого развития, управления водными ресурсами, экологии и охраны окружающей среды, член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, профессор, директор ИВП РАН.

Широкую известность получили работы Данилова-Данильяна по оценке состояния рынков воды и водохозяйственных услуг в РФ и мире. Им исследованы условия экологически безопасного размещения экспортно ориентированных водоёмких производств на территории РФ, сформулированы предложения по механизмам участия в международной торговле водой. Разработана программа реализации конкурентных преимуществ водоресурсного потенциала страны как важнейшего элемента рационального природопользования, обоснованы приоритетные направления обеспечения долгосрочного присутствия РФ в системе принятия глобальных решений в области рационального использования водных ресурсов.

Автором разработана концепция «Водные ресурсы как стратегический фактор развития экономики России на долгосрочную перспективу», в которой обоснована необходимость усиления роли водохозяйственного комплекса в народном хозяйстве и разработки стратегий водопользования на фундаментальной научной основе с учётом обеспечения экономики страны водными ресурсами и прогноза потребностей мировой экономики в водоёмкой продукции. Основные положения разработанной концепции легли в основу утверждённой Правительством РФ «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года», а также федеральной целевой программы развития водохозяйственного комплекса России, направленной на реализацию Водной стратегии.

Данилов-Данильян успешно совмещает научно-исследовательскую деятельность с преподаванием в крупных вузах страны: он заведует кафедрой «Отраслевое и природно-ресурсное управление» факультета государственного управления МГУ им. М.В. Ломоносова; с 2005 г. возглавляет кафедру «Экология и управление водными ресурсами» на экологическом факультете РУДН; с 2010 г. руководит Международной кафедрой ЮНЕСКО «Управление водными ресурсами и экогидрология». Под руководством Данилова-Данильяна защищено более 40 кандидатских диссертаций.

Заместитель академика-секретаря бюро Отделения наук о Земле РАН, председатель Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», выполняет большую научно-организационную работу в составе российских и международных комитетов, комиссий. Главный редактор журнала «Водные ресурсы», член редколлегии журнала «Экологическое планирование и управление» и других журналов.

Лауреат премии Правительства Российской Федерации «За разработку и создание природоохранного комплекса контроля экологического состояния водной среды» (1996 г.), лауреат национальных экологических премий (2006, 2013 гг.), награждён правительственными наградами.

Автором опубликовано более 600 научных работ, из них 36 монографий. Результаты его фундаментальных исследований получили заслуженное признание российских и зарубежных учёных и существенно повлияли на формирование современных научных представлений по широкому кругу вопросов. В числе наиболее значимых публикаций за период деятельности в Институте: Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Рейф И.Е. Перед главным вызовом цивилизации М., ИНФРА-М, 2005; Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты. М., Наука, 2006; Danilov-Danilyan V.I., Losev K.S., Reyf I.E. Sustainable Development and the Limitation of Growth. Springer/Praxis. London, Chichester, 2009; Данилов-Данильян В.И. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России. М., Общественная палата РФ, 2009; Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М., Научный мир, 2010; Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В.Г. и др. Водные ресурсы и качество вод: состояние и проблемы управления М., РАСХН, 2010; Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В.Г. и др. Экономические и территориальные аспекты управления водохозяйственным комплексом России М., РАСХН, 2013; Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Согласование стратегий трансграничного водопользования. М., Изд-во «Энциклопедия», 2016.

Монография В.И. Данилова-Данильяна, К.С. Лосева «Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты» удостоена «Национальной экологической премии – 2006» Фонда им. В.И. Вернадского и Комитета по экологии Государственной думы.

В 2013 г. Данилов-Данильян в составе авторского коллектива удостоен Главной премии Международной академической издательской компании «Наука/Интерпериодика» за лучшую публикацию в издаваемых ею журналах.

ДЕБОЛЬСКАЯ Елена Ивановна – известный специалист в области гидродинамики открытых и подледных потоков, доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики РУДН, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

Ею обобщены данные по ледовым явлениям на территории Российской Федерации, обоснованы методики прогнозирования возможных катастрофических ситуаций в зимний период, связанных с распространением загрязняющих веществ в водотоке при активных ледовых явлениях. Разработан комплекс математических моделей, позволяющий определить наиболее значимые факторы, влияющие на формирование заторов льда; дать прогноз условий их возникновения и катастрофических подъёмов уровня воды; оценить возможные деформации русла, вызванные действием заторов; обосновать практические рекомендации по предотвращению зимних наводнений и смягчению чрезвычайных экологических ситуаций.

Предложения Дебольской включены в Строительные нормы и правила для проектирования гидротехнических сооружений и Федеральные нормативные документы, регламентирующие оценку последствий воздействия ледовых затруднений на экологию водных объектов.

Автор и соавтор 88 научных работ, включая 2 монографии: Дебольская Е.И. «Динамика водных потоков под ледяным покровом». Изд-во Московского государственного университета природообустройства. 2003. 263 с.; Дебольская Е.И. «Математические модели ледовых заторов и их последствий» Москва, изд. РУДН, 2014, 131с.

ДЕБОЛЬСКИЙ Владимир Кириллович – ведущий отечественный специалист в области гидравлики и инженерной гидрологии, изучения и моделирования транспорта наносов, береговых деформаций, термического режима водных объектов, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией динамики русловых потоков и ледотермики ИВП РАН.

Разработанные под руководством Дебольского и при его непосредственном участии методы гидравлических и гидродинамических расчётов вошли в нормативные документы: Строительные нормы и правила (СНИП), Указания по гидрологическим расчётам при проектировании водохранилищ, а также в учебники для строительных специальностей вузов.

Эксперт комитетов по экологии Государственной Думы РФ и Федерального собрания РФ, член Диссертационного совета при ИВП РАН, член Учёного совета Института и редколлегии журнала «Водные ресурсы».

Более 50 лет Дебольский преподаёт гидравлику и гидротехнику в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ) и Российском университете дружбы народов (РУДН). Под его руководством подготовлено более 20 кандидатов наук.

Автор и соавтор более 100 научных работ, из них 2 монографии: Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М., Наука, 1980, 216 с.; Россинский К.И., Дебольский В.К., Зайдлер Р. и др. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М., Наука, 1994, 303 с.

ДЖАМАЛОВ Роальд Гамидович – ведущий специалист в области гидрогеологии, региональной оценки водных ресурсов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий лабораторией гидрогеологических проблем охраны окружающей среды ИВП РАН.

Научные исследования посвящены теоретическим и методическим вопросам изучения и картирования подземного стока как компонента окружающей среды и общих водных ресурсов, исследованиям взаимодействия подземных, поверхностных и морских вод, региональной оценке подземного стока в моря и океаны, роли подземных вод в водном балансе крупных регионов.

Широкую известность приобрели работы автора в области морской гидрогеологии. В соавторстве с И.С. Зекцером им разработаны методы количественной оценки подземного стока в моря, проведена региональная оценка субмаринного подземного стока по земному шару в целом, отдельным континентам, бассейнам морей и океанов.

Под руководством Джамалова исследованы процессы загрязнения подземных вод под влиянием рассредоточенных источников, уточнены их масштабы, получены оценки и прогноз воздействия на гидрогеологические системы.

Джамалов ведет активную преподавательскую деятельность в Международном Университете «Дубна» и в Российском университете дружбы народов. Под его руководством защищены 2 кандидатские диссертации.

Председатель Секции гидрологических наук при Национальном геофизическом комитете России, эксперт подкомитета Госдумы РФ по водным ресурсам, ученый секретарь диссертационного совета при ИВП РАН, член Учёных советов ИВП РАН и университета «Дубна»; член редколлегий журналов «Водные ресурсы», «Недропользование – XXI век», член-корреспондент Российской академии естественных наук, член Аме-

риканского института гидрологии. Фундаментальные результаты Джамалова отмечены премией РАН имени Ф.П. Саваренского.

Автор и соавтор более 190 научных статей, 2-х крупных картографических изданий (Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России, Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России) и 14-ти монографий, в том числе: Джамалов Р.Г. Подземный сток Терско-Кумского артезианского бассейна. Изд-во Наука, М., 1973; Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Месхетели А.В. Подземный сток в моря и Мировой океан. Изд-во Наука, М., 1977; Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Месхетели А.В. Подземный водообмен суши и моря. Гидрометеоиздат, Л., 1984; Dzhamalov R. G. Zektser I.S. Role of groundwater in the hydrological cycle and in continental water balance. UNESCO, Paris, 1988; Джамалов Р.Г., Зекцер И.С. Подземные воды в водном балансе крупных регионов. Изд-во Наука, М., 1989; Dzhamalov R.G., Zektser I.S. Submarine Groundwater. CRC Press, USA, 2006.

ДОБРОВОЛЬСКИЙ Сергей Гаврилович – ведущий специалист в области глобальной гидрологии, оценки гидрологических последствий изменения климата, доктор географических наук, заведующий лабораторией глобальной гидрологии ИВП РАН.

Широкую известность получили работы Добровольского в области глобальной гидрологии, изменений гидрологических процессов на поверхности суши в климатическом и промежуточных масштабах времени. Предложены новые методы оценки возможных изменений речного стока на отдалённую перспективу вследствие парникового эффекта с учётом параметров неопределённости оценок вследствие различных факторов, в том числе возможных естественных изменений глобального климата. Под руководством Добровольского и при непосредственном участии созданы и анализируются компьютерные базы данных по годовому, максимальному и минимальному речному стоку (на всех материках), разработана и постоянно пополняется база данных по наводнениям в мире и России (в настоящее время она содержит информацию по более чем 3000 наводнений в мире, в т.ч. по 550 наводнениям в России). Разрабатываются объединённая база данных по параметрам проточных озёр и изменениям стока озёрных рек, а также база данных по водохранилищам мира и изменениям стока рек, на которых имеются крупные гидротехнические сооружения.

Член Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», Учёного и Диссертационного советов Института водных проблем

РАН; редколлегия журнала «Водные ресурсы», Российского географического общества.

Автор более 100 научных трудов, в том числе монографий: Добровольский С.Г. Аномалии глобального теплообмена. М., Советский геофизический комитет, 1991, 128 с.; Dobrovolski S.G. Global climatic changes in water and heat transfer-accumulation processes. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1992, 282 p.; Dobrovolski S. G. Stochastic climate theory. Springer, Heidelberg et al., 2000, 296 p.; Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М., ГЕОС, 2002, 232 с.; Добровольский С.Г., Истомина М.Н. «Наводнения мира». М., Геос, 2006, 259 с.; Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М., Геос, 2011, 660 с.

ДОЛГОПОЛОВА Елена Николаевна – известный специалист в области изучения турбулентной структуры открытого и подлёдного речного потока, моделирования взаимодействия потока с подвижным дном, процессов проникновения морских вод в устья рек и смешения пресных и солёных вод в низовьях рек, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

Член Международной Ассоциации Гидравлических исследований (IAHR), научный редактор журнала «Водные ресурсы». В 2005–2011 гг. читала курсы лекций в Московском государственном строительном университете по специальностям «Гидравлика» и «Гидравлика трубопроводов». Награждена Международной академической издательской компанией «Наука/Интерпериодика» премией за лучшую публикацию в журнале «Водные ресурсы» в 1999 г. В 2010 г. награждена почётной медалью Московского государственного строительного университета «За заслуги в строительном образовании и науке». Автор более чем 120 научных работ.

ЗЫРЯНОВ Валерий Николаевич – ведущий специалист в области геофизической гидродинамики, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией гидродинамики ИВП РАН. Область научных интересов – динамика морских течений, вихри над неровностями рельефа дна, обтекание островов, трансформация приливных волн на мелководье, остаточные течения в окраинных морях, подлёдные течения, термодинамика льда, движение жидкости в пористых средах.

Всемирную известность получили работы Зырянова по развитию гидродинамической теории градиентно-вязкого режима

течения жидкости. На базе этой теории Зыряновым обнаружены новые явления, в частности эффект нелинейной накачки уровня в прибрежной зоне и в устьях рек приливных морей, развита общая математическая теория этого эффекта для нелинейных параболических дифференциальных уравнений, который получил название пампинг-эффекта. Теория пампинг-эффекта применена для описания интрузии морских вод в устья приливных рек, роста льда на озёрах и водоёмах суши, теплообмена с глубинными слоями океана, она позволила открыть новый тип донных песчаных макроформ – инверсные дюны, описать новый механизм остаточного перемещения мелкодисперсной взвеси в зоне взаимодействия морских и речных вод.

Под руководством Зырянова подготовлено 6 кандидатов наук и один доктор наук.

Автор поддерживает тесные научные контакты с ведущими гидродинамическими центрами: Институтом механики г. Гренобль (Франция) и Университетом Данди (Великобритания). Профессор кафедры водных ресурсов ИВП РАН; член Европейского общества механиков ЕВРОМЕХ, член Научного совета Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши», Учёного совета Института, диссертационных советов при ИВП РАН и Институте океанологии РАН; заместитель главного редактора журнала «Водные ресурсы», член редколлегии журнала «Процессы в геосредах».

Автором опубликовано более 100 научных работ, из них 2 монографии: Зырянов В.Н. Теория установившихся океанических течений. Л., Гидрометеиздат, 1985, 248 с.; Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М., ИВП, 1995, 238 с.

ИОНОВ Дмитрий Николаевич – старший инженер лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики ИВП РАН.

КРЕМЕНЕЦКАЯ Екатерина Рифовна – специалист по разработке методов исследования внутриводоёмных процессов, оценки влияния антропогенных факторов на эти процессы, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. Изучает особенности кислородного режима и режима взвешенного вещества в Можайском и Иваньковском водохранилищах. Получала поддержку грантов РФФИ и президента РФ. Имеет более 40 научных работ.

КУЗЬМИНА Жанна Вадимовна – ведущий отечественный специалист в области гидрогенной динамики экосистем, оценки трансформации наземных экосистем при изменении водно-

го режима территорий в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений, доктор географических наук, заведующая лабораторией динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора ИВП РАН.

Основные направления научной деятельности – динамика экосистем, влияние климатических и гидрологических изменений на экосистемы, оценка динамических изменений экосистем и их компонентов, биоразнообразие, охрана природы. Кузьминой получены новые результаты в области изучения динамических изменений наземных экосистем поймы и дельты Нижней Волги под влиянием зарегулирования речного стока и климатических флуктуаций, влияния климатических и гидрологических изменений на трансформацию естественных и антропогенно нарушенных в результате мелиорации экосистем зоны южной тайги.

Член Русского географического общества и Российской экологической академии, научно технического совета (НТС) секции охраны водных экосистем «Центрального Управления по рыбохозяйственной экспертизе и нормативам по сохранению, воспроизводству водных биологических ресурсов и акклиматизации». Главный редактор журнала «Экосистемы: экология и динамика», заместитель главного редактора журнала «Аридные экосистемы».

Автор более чем 120 научных работ, в том числе, соавтор монографии Novikova N.M., Kuz'mina J.V. Monitoring of the vegetation in conditions of the Aral Sea ecological crisis. Moscow, RAAS, 2008, 218 p.

КУРБАТОВА Ирина Евгеньевна – ведущий отечественный специалист в области разработки методов и технологий исследования водных объектов и их бассейнов с использованием данных спутникового зондирования поверхности Земли, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

Основные научные достижения связаны с разработкой методов оценки геоэкологического состояния водных объектов с использованием картографических и дистанционных методов исследований, разработки структуры комплексного мониторинга единой геосистемы «водосбор – водоток – водоём».

За последние годы Курбатовой созданы оригинальные методики составления тематических карт, отражающих динамику и прогноз состояний речных водосборов, береговых зон морей и водохранилищ, прибрежных акваторий в результате возрастания антропогенной нагрузки и/или возникновения стихийных бедствий.

Член Рабочей группы по вопросам отработки технологий целевого применения гиперспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» при Научном Центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) ОАО «Российские космические системы».

Более 20 лет доцент Курбатова ведёт преподавательскую работу на кафедре картографии и геоинформатики Московского университета геодезии и картографии. Под её научным руководством успешно защищено более 30 дипломных проектов. Курбатова – автор более 80 научных публикаций; несколько карт опубликовано в атласах МЧС (2005 и 2007 гг.) и Национальном Атласе России (2007 г.).

КУЧМЕНТ Лев Самуилович – всемирно известный специалист в области изучения и моделирования процессов гидрологического цикла суши, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий лабораторией гидрологического цикла ИВП РАН.

Создатель отечественной школы физико-математического моделирования гидрологических процессов, которая объединяет ведущих специалистов в этой области. Учениками Кучмента в разные годы были д.ф.-м.н. А.Н. Гельфан, д.ф.-м.н. В.Н. Демидов, к.г.н. Ю.Г. Мотовилов, к.г.н. В.Ю. Смахтин – всего 16 кандидатов и докторов наук. Под руководством Кучмента и при его непосредственном участии разработаны первые в мире физико-математические модели процессов формирования снежного покрова и снеготаяния, инфильтрации воды в мёрзлую почву, промерзания почвы, испарения почвенной влаги, внутрпочвенного стока, взаимодействия поверхностных и подземных вод, переноса примеси водными потоками на водосборе и в речном русле. Широкую известность имеет цикл работ автора в области моделирования неустановившегося движения воды и формирования речных русел; им впервые найдены эффективные методы решения обратных задач речной гидравлики.

Фундаментальные научные достижения школы Кучмента используются для решения прикладных задач гидрологии суши. На основе разработанных моделей созданы новые методики оценки изменений речного стока в результате деятельности человека на водосборе и климатических изменений, предложены новые методы оценки риска и масштабов катастрофических наводнений, прогнозирования весеннего половодья и дождевых паводков. Кучмент одним из первых, ещё в начале 1970-х гг., начал разрабатывать автоматизированные систе-

мы гидрологических прогнозов (одна из таких систем была разработана для бассейна р. Волги).

Более 30 лет профессор Кучмент вёл преподавательскую работу на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Сейчас читает курс лекций на кафедре водных ресурсов ИВП РАН.

Основные научные достижения отражены в 160 публикациях, включая 7 монографий, которые являются настольными книгами уже третьего поколения гидрологов – специалистов в области моделирования гидрологических процессов: Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л., Гидрометеиздат, 1971, 191 с.; Кучмент Л.С. Моделирование процессов формирования речного стока. Гидрометеиздат, Л., 1980, 143 с.; Кучмент Л.С. Гидрологическое прогнозирование для управления водноресурсными системами. Изд. ВИНТИ, М., 1981, 120 с.; Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Физико-математические модели. М, Наука, 1983, 216 с.; Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических моделей. М., Наука, 1990, 143 с.; Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М., Наука, 1993, 104 с.; Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М., РАСХН, 2008, 394 с.

МАСЛИКОВА Оксана Яковлевна – специалист в области математического моделирования деформаций дна в покрытых льдом нестационарных потоках, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

МИХАЙЛОВ Вадим Николаевич – всемирно известный специалист в области гидрологии рек, озёр, дельт и эстуариев, прибрежной зоны морей, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный профессор Московского университета.

Михайловым разработана теория гидролого-морфологических процессов в устьях рек. Широкоую известность приобрели его работы, в которых предложены новые методы расчёта водного баланса речных дельт, распределения стока воды по рукавам дельт, смешения речных и морских вод. На основе результатов организованных Михайловым экспедиционных работ в устьях рек Волги, Терека, Сулака, Кубани, Северной Двины, Печоры, Пура, Таза, Енисея, Лены, Яны, Индигирки, Амура, Амударьи, Дуная, Днепра и Южного Буга, Риони получены новые данные об изменениях гидрологического режима, строения и экологических условий этих объектов.

В течение нескольких десятилетий Михайлов вёл огромную преподавательскую работу на кафедрах гидрологии суши и океанологии географического факультета МГУ, руководил подготовкой 21 кандидатской и 3-х докторских диссертаций. Им опубликовано более 350 научных работ, среди которых 13 научных монографий, четыре научно-методических руководства (в том числе, одно издание ЮНЕСКО на английском языке). Автором изданы три учебника и одно учебное пособие, среди них известные учебники: Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1998 и Михайлов В. Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. Учебник. М., Высшая школа, 2008.

Основные достижения Михайлова представлены в монографиях, которые являются настольными книгами нескольких поколений гидрологов: Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в непривливаемых устьях рек. М., Гидрометеиздат, 1971; Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л., Гидрометеиздат, 1986; Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М., ГЕОС, 1997; Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М., ГЕОС, 1997.

МИХАЙЛОВА Мария Вадимовна – ведущий специалист в области изучения гидрологических и морфологических процессов в устьях рек, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

Михайловой разработан балансовый подход при оценке процесса дельтоформирования в условиях естественных и антропогенных изменений речных и морских факторов. На примере устьев рек, впадающих в Каспийское море, ею предложены типовые схемы изменения строения и гидрологического режима дельт в условиях как повышения, так и понижения уровня приёмного водоёма, а также в случаях антропогенного сокращения стока наносов рек. Для оценки процесса затопления приморской части дельты при повышении уровня моря ею разработана концепция подпорной призмы; эта концепция позволяет путём сравнения объёма подпорной призмы с объёмом стока наносов реки рассчитать, будет ли дельта при повышении уровня моря выдвигаться в море или затопляться. На примере многих рек мира Автором изучены особенности проникновения в реки и рукава дельт осолонённых морских вод и проверен ряд соответствующих расчётных методов; ею также выявлены предельные значения дальности проникновения осолонённых вод и «критические» расходы воды реки, при которых начинается такое проникновение.

Член Национального комитета Российской Федерации по Международной гидрологической программе ЮНЕСКО, ответственный секретарь редколлегии журнала «Водные ресурсы», член редколлегий журналов «Environmental Research, Engineering and Management» и «The Journal of Water Security», энциклопедии «Реки и озёра мира», ведёт преподавательскую работу на кафедре Водных ресурсов ИВП РАН.

Автор и соавтор около 150 научных работ, автор более 250 статей в Большой Российской Энциклопедии, Энциклопедии «Реки и озёра мира», научно-популярной энциклопедии «Вода России» (<http://water-rf.ru>). Соавтор крупных коллективных монографий «Гидрология устьев рек Терека и Сулака» (Наука, 1993), «Гидрология дельты Дуная (ГЕОС, 2004), «Эстуарно-дельтовые системы России и Китая (ГЕОС, 2007), «The Black Sea Environment» (Springer, 2008), «Устья рек Каспийского региона» (ГЕОС, 2013). Михайлова трижды отмечена премиями МАИК «Наука/Интерпериодика» за лучшие публикации в журнале «Водные ресурсы».

МОТОВИЛОВ Юрий Георгиевич – ведущий специалист в области математического моделирования гидрологических процессов в речных бассейнах, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

Автор первых в мире работ по физико-математическому моделированию процессов инфильтрации воды в мёрзлую почву, формирования и таяния снежного покрова в применении к гидрологическим задачам. На основе этих моделей разработаны методики расчётов и прогнозов стока весеннего половодья на равнинных водосборах, предложены методы оценки изменений речного стока в результате деятельности человека на водосборе и климатических изменений.

Мотовилов – создатель наиболее известной в мире отечественной модели формирования речного стока ECOMAG, разработанной на базе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов Л.С. Кучмента. Модель описывает распределённые по пространству процессы формирования и таяния снежного покрова, гидротермические процессы в почве при её промерзании и оттаивании, инфильтрации воды в мёрзлую и незамерзшую почву, испарения и эвапотранспирации, стекания воды по поверхности водосбора, подповерхностного и грунтового стока, движения воды в речной системе, а также пространственные поля характеристик гидрологического цикла суши для крупных речных бассейнов. ECOMAG – первая в России физико-математическая гидрологическая модель, доведённая до уровня

автоматизированного информационно-программного комплекса, включающего, помимо расчётного блока, специализированные ГИС-приложения, средства автоматизированной обработки пространственно-распределённой информации. С 2002 г. комплекс ECOMAG используется в оперативной практике Росводресурсов для информационного обеспечения задач регулирования стока водохранилищами Волжско-Камского каскада.

Под руководством Мотовилова защищены пять диссертаций, в том числе две – зарубежными учёными в 1990-е гг., когда он работал в ведущих исследовательских организациях Норвегии, Швеции, Японии.

На протяжении многих лет читает лекции на курсах повышения квалификации специалистов Росгидромета и кафедре водных ресурсов ИВП РАН.

Автором опубликовано более 100 работ в ведущих научных журналах, а также 2 монографии: Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока (Физико-математические модели). Наука, М, 1984, с. 216; Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических систем. Наука, М, 1990, 144 с.

МУЗЫЛЁВ Евгений Львович – ведущий отечественный специалист в области моделирования гидрологических процессов с использованием данных дистанционного зондирования, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

Широкую известность приобрели работы Музылёва по применению данных спутникового зондирования земной поверхности для моделирования стока горных рек, водного и теплового режимов сельскохозяйственных регионов. Впервые в стране им предложены методы ассимиляции спутниковых данных о характеристиках растительного покрова, влажности почвы и осадках для совершенствования методов физико-математического моделирования вертикального тепло- и влагопереноса в системе «почва-растительность-атмосфера».

Автор и соавтор более 100 научных публикаций, в том числе, им опубликована монография «Моделирование стока горных рек и спутниковая информация». М., Наука, 1987. 136 с. Под совместной редакцией Е.Л.Музылёва и Л.С.Кучмента опубликована монография «Моделирование гидрологического цикла речных водосборов». Изд-во ВИНТИ, 1993.

МЯГКОВА Кристина Геннадьевна – инженер лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды.

НАСОНОВА Ольга Николаевна – известный специалист в области изучения и моделирования процессов тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН. Соавтор совместной с Е.М. Гусевым разработки отечественной модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP. Автор более чем 160 научных публикаций.

В 2008 году за цикл работ, посвящённых исследованию влаго- и теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой и опубликованных в журналах издательства МАИК «НАУКА»/Интерпериодика, Е.М. Гусеву совместно с Насоновой была присуждена Главная премия этого издательства.

Наиболее цитируемый в изданиях базы Web of Science отечественный специалист в области исследования и моделирования тепло – и влагообмена поверхности суши с атмосферой. Входят в престижный список «Кто есть кто в Российской науке» <http://expertcorps.ru/science/whoiswho>, объединяющий ученых из всех областей науки, имеющих наибольшее число цитирований в базе Web of Science.

НИКАНОРОВ Анатолий Максимович – всемирно известный специалист в области гидрохимии, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, заслуженный метеоролог Российской Федерации, заведующий гидрохимическим отделом ИВП РАН (в г. Ростов-на-Дону).

Широкую известность приобрели работы Никанорова, связанные с разработкой методов гидрохимических исследований, созданием научных основ натурального и математического моделирования пресноводных экосистем. Под его руководством разработаны научные основы системы мониторинга качества вод суши и оперативного мониторинга в условиях чрезвычайных ситуаций. Фундаментальные результаты исследований Никанорова отмечены премией Российской академии наук им. П.Ф. Саваренского, двумя международными премиями в области водных ресурсов.

Член Президиума Южного научного центра РАН», выполняет большую научно-организационную работу в составе российских и международных комитетов и комиссий, главный редактор журнала «Гидрохимические материалы», член редколлегий журналов «Водные ресурсы», «Метеорология и гидрология»; член Учёного и Диссертационного советов ИВП РАН, почётный профессор Висконсинского университета США, заведующий кафедрой в Южном Федеральном университете

(ЮФУ). Заслуги А.М. Никанорова отмечены многочисленными правительственными наградами.

Автор и соавтор 553-х публикаций, из них 45 монографий, в том числе, опубликованных за последние годы: Никаноров А.М. Научные основы мониторинга качества вод СПб., Гидрометеоздат, 2005. 575 с.; Никаноров А.М., Бакаева Е.Н. Гидробионты в оценке качества вод М. Наука, 2006. 239 с.; Никаноров А.М., Страдомская А.Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем Ростов-на-Дону: Изд-во «НОК», 2008, 228 с.; Никаноров А.М., Сухоруков Б.Л., Трофимчук М.М. Методы экспериментальной гидроэкологии. Изд. НОК, 2012, 350 с.; Nikanorov A.M. Monitoring of Water Quality (Scientific and Applied Aspects) New York: Nova Science Publishers, 2013, 446 с.; Никаноров А.М. Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Ростов-на-Дону: Изд-во «ЮФУ», 2015, 164 с.

НОВИКОВА Нина Максимовна – ведущий отечественный специалист в области ландшафтной экологии и динамики наземных экосистем, изучения закономерностей динамики биокомплексов под влиянием изменений водного режима территорий, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВП РАН

Широкую известность получили результаты Новиковой по оценке экологических последствий природных и антропогенно обусловленных изменений водного режима территорий для наземных экосистем, развитию теории экологически дестабилизированной среды. Под её руководством получены новые результаты в области исследований экотонных систем «вода – суша», их структурно-функциональной организации и динамики.

Председатель Комиссии биогеографии Московского отделения Русского географического общества (РГО), более 20 лет – заместитель главного редактора журнала «Аридные экосистемы», член Учёного совета Московского отделения РГО, Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», учёных и диссертационного советов Института водных проблем РАН и географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; эксперт РФФИ и РНФ по вопросам биогеографии и геоэкологии. Руководитель и исполнитель с российской стороны программ ЮНЕСКО «Ecological research and monitoring of the Aral sea deltas; «Aral Sea Project».

Под руководством Новиковой защищены 6 кандидатских и одна докторская диссертации.

Автор и соавтор более 250-ти научных публикаций, в том числе монографий: Новикова Н.М., Полянская А.В. Самурские лиановые леса: проблема сохранения биоразнообразия в условиях развивающегося водного хозяйства. Москва, РАСХН, 1994, 150 с.; Novikova N.M., Kuz'mina J.V. Monitoring of the vegetation in conditions of the Aral Sea ecological crisis. Moscow, RAAS, 2008, 218 p.; Экотонные экосистемы «вода – суша»: методика исследований, структурно-функциональная организация и динамика / Авторский коллектив: Новикова Н.М. и др. / [Отв. ред. Новикова Н.М.]. М., Товарищество научных изданий КМК, 2011, 272 с.; Природные комплексы побережья Цимлянского водохранилища / Авторский коллектив: Новикова Н.М. и др. / [Отв. ред. Новикова Н.М.]. М., Агронаучсервис, 2014, 152 с.

ПЕРЕКАЛЬСКИЙ Владимир Михайлович – специалист в области моделирования термогидродинамических процессов в открытых водных потоках, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. Автор известной отечественной модели DYNAMASS, предназначенной для расчёта гидродинамического и термодинамического режимов открытых потоков, распространения загрязняющих веществ. Особое место занимают работы, в которых моделируются процессы распространения нефтяного загрязнения в различных аварийных ситуациях. Имеет более 40 научных работ.

РЕШЕТНЯК Ольга Сергеевна – специалист в области гидрохимии и охраны вод, методов и средств контроля качества поверхностных вод, кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле Южного федерального университета.

Область научных интересов – анализ многолетней режимной гидрохимической и гидробиологической информации и оценка изменчивости состояния пресноводных экосистем, исследование региональных особенностей изменчивости состояния пресноводных экосистем и установление границ возможных колебаний системообразующих показателей их состояния.

Автор и соавтор более 100 научных работ из них 2 монографии: Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Решетняк О.С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций: Ростов-на-Дону, "НОК", 2012, 308 с.; Брызгалов В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Изд-во Южного федерального университета, 2015, 164 с.

САФРОНОВА Татьяна Ивановна – ведущий инженер лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды.

СУХОРУКОВ Борис Львович – известный специалист в области оценки качества вод с использованием данных об излучательных свойствах водных объектов, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. На основе результатов многолетних исследований Сухорукова показано, что получаемая из оптических спектров информация в значительной степени является уникальной при изучении свойств экосистем.

ФЕРРОНСКИЙ Василий Иванович – ведущий специалист в области палеогидрологических исследований бассейнов Каспийского и Аральского морей в позднем плейстоцене-голоцене с использованием методов изотопного анализа, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВП РАН.

Наиболее значимые результаты исследований:

на основе анализа изотопного состава кислорода и углерода карбонатов и вещественного состава донных осадков, взятых из глубоководных бассейнов Южного и Среднего Каспия, оценены трансгрессивно-регрессивные циклы, определяющие изменение уровня моря, скорости природных течений и области сноса терригенного материала. Показано, что 10–12 тыс. лет назад Каспийское море оставалось полностью разделённым на два водоёма Апшеронским порогом;

получены количественные данные короткопериодических изменений режима и амплитуды колебания уровня моря;

восстановлена картина периодических климатических и гидрологических изменений в Арало-Каспийском регионе по данным об изотопном, вещественном и гидрохимическом составе осадков и водных масс Каспийского и Аральского морей, залива Кара-Богаз-Гол, озера Иссык-Куль и рек региона;

подготовлена компьютерная базы данных о закономерностях распределения ^{13}C , ^{14}C , ^{18}O в донных отложениях озёр, морей и эстуариев рек в зависимости от изменения климата и окружающей среды за последние 10 000 лет.

Ферронским с соавторами опубликовано около 300 научных работ (из них 20 монографий, справочников, учебников) на русском, английском, французском, немецком, испанском, китайском и арабском языках. Результаты его фундаментальных исследований в области изотопного анализа, опубликованные в 5-ти монографиях, широко известны в нашей стране и за

рубегом: Космогенные изотопы гидросферы (Cosmogenic isotopes in the hydrosphere) // В.И Ферронский, В.А. Поляков, В.В. Романов; отв. ред. В.Г. Онуфриев. М., Наука, 1984, 268 с.; Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М., Научный Мир, 2009, 632 с.; Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Isotopes of the Earth's Hydrosphere. Dordrecht-Heidelberg, Springer, 2012, 628 p.; Ferronsky V.I. Nuclear Geophysics. Dordrecht-Heidelberg, Springer, 2015, 522 p.

ФРОЛОВ Анатолий Васильевич – ведущий специалист в области стохастической гидрологии, стохастического и динамико-стохастического моделирования многолетних гидрологических процессов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН

Основные научные достижения связаны с разработкой динамико-стохастических моделей многолетних колебаний уровней проточных и бессточных озер (Каспийского моря, озера Байкал, Ладожского озера и др.), стока рек озёрного питания (реки Нева, Ангара, Свидь, Онега и др.) и «неозёрных» рек. Эти модели получены в рамках теории стохастического резервуара. По оценке выдающегося гидролога 20 в. В.Клемеша, «...его [Фролова] работы внесли фундаментальный вклад в стохастическую теорию гидрологических резервуаров со свободным оттоком воды. Таким приближением могут быть описаны природные гидрологические системы, например, речные бассейны, водоносные подземные горизонты, озёра».

Принципиально новым является предложенный Фроловым подход к моделированию многолетних гидрологических процессов как выходных процессов соответствующих систем, обладающих в общем случае положительными и отрицательными обратными связями. В рамках линейного приближения были получены аналитические зависимости, связывающие статистические характеристики выходных и входных процессов. Эти зависимости использовались для оценки реакции многолетних выходных процессов (уровней воды в озёрах, стока озёрных и неозёрных рек и т.п.) на изменения входных процессов (притока в озёра, осадков, испарения на водосборах), вызванных техногенными и/или климатическими воздействиями. Фроловым предложен новый подход к решению обратной задачи – нахождению статистических характеристик входного процесса и параметров гидрологической системы по характеристикам выходного процесса. На основе предложенного подхода Фроловым получены новые результаты по оценке основных статистических характеристик многолетних из-

менений испарения с водосборов крупных рек, а также параметра инерционности водосборов.

Научные результаты автора нашли применение при решении ряда практических задач: расчёта характеристик уровня режима Каспийского моря при разработке мероприятий по защите побережья моря от подъёма уровня, для проектов освоения запасов углеводородов в прибрежно-шельфовой зоне моря, для выбора безопасной отметки размещения АЭС на морском побережье и других проектов.

Автор более 50 научных работ, в том числе 2 монографий: Фролов А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озёр. М., Наука, 1985, 103 с.; Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М., Геос, 2003, 169 с.

ХОРУЖАЯ Татьяна Алексеевна – известный специалист в области исследований токсичности поверхностных вод, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВП РАН. Результаты многолетних исследований автора позволили оценить эколого-токсикологическое состояние водных объектов Южного региона России, выявить степень экологического неблагополучия, выполнить анализ формирования качества воды по химическим, токсикологическим (биотестовым) и гидробиологическим показателям, а также многолетних тенденций их изменений.

ХРАНОВИЧ Иосиф Лазаревич – ведущий отечественный специалист в области математического моделирования в задачах управления водными ресурсами, согласования стратегий водопользования, доктор технических наук, главный научный сотрудник ИВП РАН.

Широкую известность приобрели работы Храновича по разработке потоковых моделей управления водными ресурсами, обоснования параметров и режимов водохозяйственных систем (в том числе с учетом качества водных ресурсов). Новые результаты получены автором в области исследования свойств потоковых моделей, предложены методы решения описывающих их задач и процедуры взаимодействия различных моделей. Разработана методология и обоснованы методы выработки стратегий управления водохозяйственными системами в условиях неопределённости; предложены процедуры и разработаны математические модели разрешения конфликтных ситуаций водопользования.

Автор и соавтор более 150 научных работ, в том числе 5 монографий: Великанов А.Л., Хранович И.Л., Клепов В.И. Проблемы надёжности при многоцелевом использовании водных ресурсов. М., Наука, 1994, 225 с.; Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Поточковые модели. М., Научный мир, 2001, 295 с.; Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М., Научный мир, 2010, 232 с.; Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Поточковые модели. Издание 2-е, исправленное, дополненное. М., Научный мир, 2013, 390 с.; Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Согласование стратегий трансграничного водопользования. М., Энциклопедия, 2016, 216 с.

ЧИГАНОВА Мария Алексеевна – специалист в области оценки и мониторинга ксенобиотического (в частности лекарственного) загрязнения водных объектов, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. Соавтор первой в стране монографии о лекарственном загрязнении природных вод (Загрязнение природных вод лекарствами / Г.М. Баренбойм, М.А.Чиганова; [отв. ред. Л.И. Эльпинер]. М., Наука, 2015, 283 с.

ЭЛЬПИНЕР Леонид Исаакович – ведущий специалист в области медико-экологических исследований вод суши, доктор медицинских наук, профессор, академик Российской экологической академии, член-корреспондент Российской академии естественных наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник ИВП РАН.

Широкую известность получили работы Эльпинера, посвящённые теоретическим разработкам и практическим приложениям медико-экологических оценок и прогнозов для обоснования и поддержки принятия решений, ориентированных на охрану здоровья населения при управлении водными ресурсами в условиях интенсивного техногенеза и изменений климата. Разработанная им методология комплексного гидрогеоэкологического и медико-экологического подхода существенно расширила представления о связях ряда патологических состояний человека с антропогенными загрязнениями подземных вод, особенностями их природного микро- и макроэлементного состава. Эти данные положены в основу новой научной дисциплины – медицинской гидрогеологии.

В последние годы исследования Эльпинера ориентированы на разработку научных основ использования медико-экологических подходов при принятии водохозяйственных управлен-

ческих решений, предусматривающих активные приёмы изменения гидрологической и гидрогеологической обстановки в интересах улучшения экологических и социальных условий жизни населения.

Научно-организационная деятельность Эльпинера связана с работой в проблемной комиссии «Гигиена окружающей среды» РАМН, в Научном Совете по проблемам биосферы РАН, участием в крупных государственных экспертизах.

Эльпинер принимал активное участие в организации Международного Конгресса «Вода: экология и технология» – «ЭК-ВАТЭК», который проводится каждые два года (с 1994г. по настоящее время, согласно постановлениям Правительства РФ); был Генеральным секретарем конгресса и ответственным редактором издаваемых научных трудов.

Международный эксперт ЮНЕП, член Американской Ассоциации качества воды, Международной озоновой Ассоциации, Международной Ассоциации гидрогеологов.

Достижения Эльпинера отмечены Почётными грамотами Президиумов АН СССР и РАН, Минприроды России, серебряной медалью РАЕН «За вклад в развитие медицины и здравоохранения».

Автор и соавтор более 350 научных работ, 3 зарубежных и 10 отечественных монографий, в том числе: «Проблемы питьевого водоснабжения США» (1983), «Опреснение воды в природе и народном хозяйстве» (1987), «Социально-экологические вопросы использования водных ресурсов» (1992), «Руководство по прогнозированию медико-биологических последствий гидротехнического строительства» (1990), «Региональные проблемы здоровья населения России» (1993), «Creeping environmental problems and sustainable development in the Aral sea basin» (UK, 1999), Groundwater and the environment (USA, 2000), «Подземные воды как компонент окружающей среды» (2001).

**ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ
ИНСТИТУТА ВОДНЫХ
ПРОБЛЕМ РАН
1967–2017**

Том 2

Компьютерная вёрстка
Е.В. Орешкина, А.И. Бурмистрова

Подписано в печать 11.09.2017
Формат 60×90 1/16. Уч.-изд. л. 45.4. Усл. печ. л. 45,0
Бумага офсетная. Гарнитура Palatino Linotype. Печать офсетная
Тираж 300 экз.

ТК 674548–939911–110917

ООО Издательство «КУРС»
127273, г. Москва, ул. Олонецкая, д. 17А, офис 104
Тел.: (495) 203-57-93
E-mail: kursizdat@gmail.com, <http://www.kursizdat.ru>