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

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

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

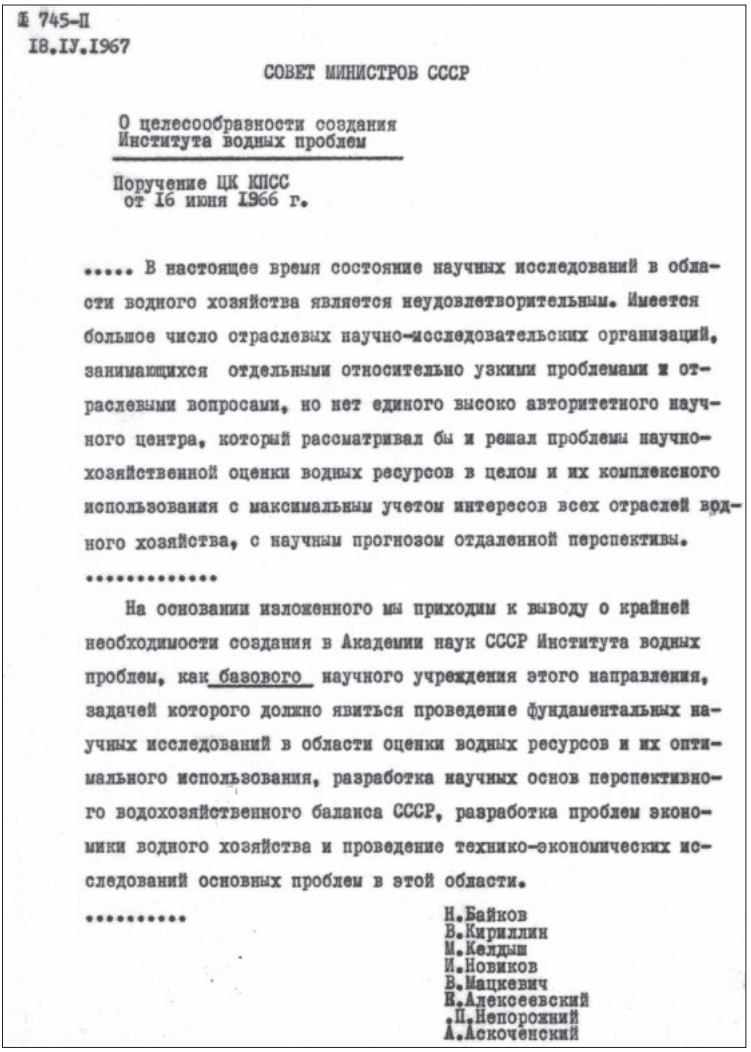
К 1960-м гг. вовлечённость водных ресурсов в отечественную экономику, антропогенные изменения естественного режима и качества вод суши достигли таких масштабов, что обеспечение водной безопасности с учётом происходящих и прогнозируемых изменений, повышение эффективности управления водными ресурсами,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



№ 745-П
18.IV.1967

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
Н.Алексеевский
П.Непорожний
А.Аскоченский

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;

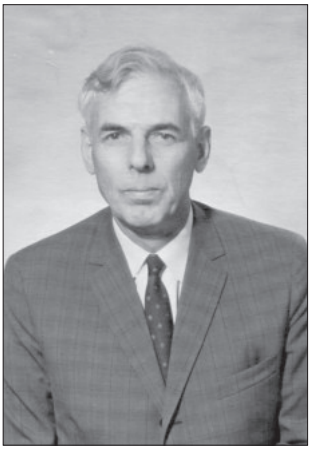
- прогноз изменения природных факторов в результате водохозяйственных мероприятий; научные проблемы экономики водного хозяйства.

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. 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. Калинину (работал в Институте в 1968–75 гг.). Биографии и статьи большинства пере-

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



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

численных выдающихся учёных помещены в эту монографию.

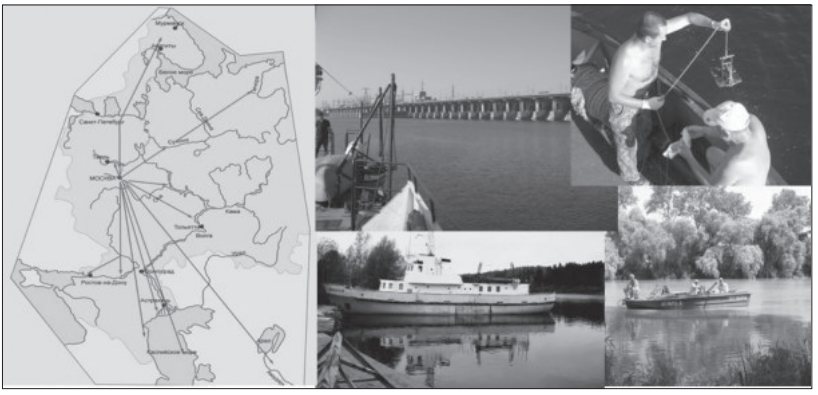
В 1973–76 гг. Институт возглавлял Владимир Николаевич Кунин – доктор географических наук, профессор, «Заслуженный деятель науки Туркменской ССР», чл.-корр. Академии наук СССР и Туркменской ССР. Вместе с коллегами А.Н. Вознесенским, Г.П. Калининым, Б.И. Куделиным Владимир Николаевич был одним из организаторов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

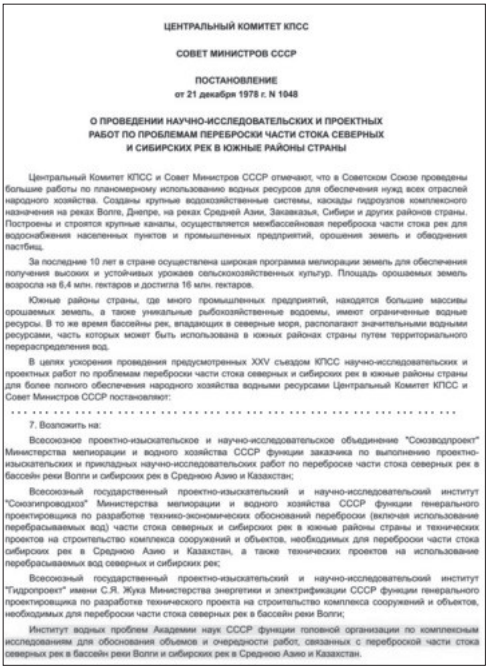


География экспедиционных работ Института в 1980-е гг.

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. №51⁶⁄₂₇²⁄₁₇₄ «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 объёмов и очерёдности работ, связанных с пере-



ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ КПСС

СОВЕТ МИНИСТРОВ СССР

ПОСТАНОВЛЕНИЕ
от 21 декабря 1978 г. N 1048

О ПРОВЕДЕНИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОЕКТНЫХ РАБОТ ПО ПРОБЛЕМАМ ПЕРЕБРОСКИ ЧАСТИ СТОКА СЕВЕРНЫХ И СИБИРСКИХ РЕК В ЮЖНЫЕ РАЙОНЫ СТРАНЫ

Центральный Комитет КПСС и Совет Министров СССР отмечают, что в Советском Союзе проведены большие работы по планомерному использованию водных ресурсов для обеспечения нужд всех отраслей народного хозяйства. Созданы крупные водохозяйственные системы, каскады гидроузлов комплексного назначения на реках Волге, Днепре, на реках Средней Азии, Закавказья, Сибири и других районов страны. Построены и строятся крупные каналы, осуществляется межбассейновая переброска части стока рек для водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий, орошения земель и обводнения пастбищ.

За последние 10 лет в стране осуществлена широкая программа мелиорации земель для обеспечения получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. Площадь орошаемых земель возросла на 6,4 млн. гектаров и достигла 16 млн. гектаров.

Южные районы страны, где много промышленных предприятий, находятся большие массивы орошаемых земель, а также уникальные рыбохозяйственные водоемы, имеют ограниченные водные ресурсы. В то же время бассейны рек, впадающих в северные моря, располагают значительными водными ресурсами, часть которых может быть использована в южных районах страны путем территориального перераспределения вод.

В целях ускорения проведения предусмотренных XXV съездом КПСС научно-исследовательских и проектных работ по проблемам переброски части стока северных и сибирских рек в южные районы страны для более полного обеспечения народного хозяйства водными ресурсами Центральный Комитет КПСС и Совет Министров СССР постановляют:

. . . . . .

7. Возложить на:

Всесоюзное проектно-изыскательское и научно-исследовательское объединение "Союзводпроект" Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР функции заказчика по выполнению проектно-изыскательских и прикладных научно-исследовательских работ по переброске части стока северных рек в бассейн реки Волги и сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан;

Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Союзгипроводхоз" Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР функции генерального проектировщика по разработке технико-экономических обоснований переброски (включая использование перебрасываемых вод) части стока северных и сибирских рек в южные районы страны и технических проектов на строительство комплекса сооружений и объектов, необходимых для переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан, а также технических проектов на использование перебрасываемых вод северных и сибирских рек;

Всесоюзный государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" имени С.Я. Жука Министерства энергетики и электрификации СССР функции генерального проектировщика по разработке технического проекта на строительство комплекса сооружений и объектов, необходимых для переброски части стока северных рек в бассейн реки Волги;

Институт водных проблем Академии наук СССР функции головной организации по комплексным исследованиям для обоснования объемов и очередности работ, связанных с переброской части стока северных рек в бассейн реки Волги и сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан.

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, вызывала 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. Вениционова, 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 Иваньковскую 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.

Домашняя страница интернет-энциклопедии «Вода России» (http://water-rf.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, GEM, IAHR, 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-

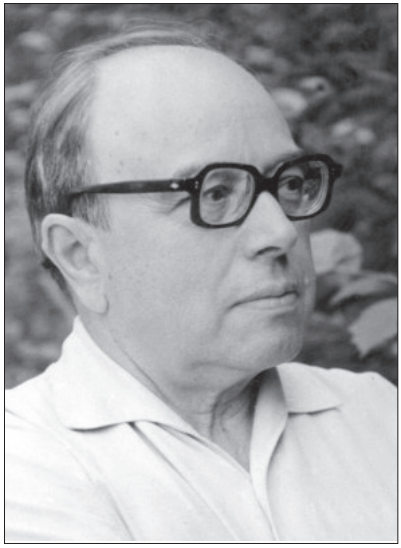
лотова, Л.В. Дунина-Барковского, В.С. Залетаева, И.С. Зекцера, Г.П. Калинина, В.С. Ковалевского, Д.В. Коренистова, С.Н. Крицкого, Б.И. Куделина, В.Н. Кунина,, М.Ф. Менкеля, В.И. Найдёнова, М.Р. Никитина, Г.Н. Панина, В.Г. Пряжинской, Д.Я. Ратковича, К.И. Россинского, Б.А. Фидмана, М.Г. Хубляряна, Л.О. 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 лагери 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 проблемам 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 «Водохранилища гидроэлектростанций СССР» (переиздавалась три раза и стала настольной книгой проектировщиков), «Гидроэнергетические ресурсы СССР», «Водохранилища мира», «Водохранилища и их воздействие на окружающую среду», «Водохранилища». 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 среду[1]

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 исследованиям 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 «Водохранилища 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, Гипроречтрансе 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 состояние 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 км^3. 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. км^3, а площадь водного зеркала равна 400 тыс. км^2. Трудно теперь найти реку, на которой нет хотя бы одного водохранилища. Волга, Днепр, Ангара, Колумбия, Миссури, Теннеси, Парана и сотни других больших и средних рек по существу стали каскадами водохранилищ.

Создание водохранилищ привело к преобразованию природных условий на территории 700 тыс. км^2 и к изменению инфраструктуры в связи с мероприятиями по переселению населения и переустройству хозяйства на территории 1,5 млн км^2 [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 Иваньковского 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, км^3)

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 отчленяются 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. Эйнор, 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 лишенные 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].

Водохранилища 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 осуходоливание [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 обусловливает 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 км^3 (в зависимости от водности года).

Водохранилища, 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. Водохранилища 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. Шарапов. 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.

Водохранилища – 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.

Водохранилища, 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 годы.

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 информациях 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.: ВИНИТИ, 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.: Гидрометеоиздат, 1986. С. 107.
10. Авакян А.Б., Вениционов 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 состояния 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 защиты[1]

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 потопы 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 нередки нагонные наводнения и цунами.

В последние столетия, в особенности в XX в., все бóльшую 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, переполивы 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. км^2, в Китае – 600 тыс., в США – 280 тыс., в Индии – 250 тыс., в Бразилии – 300 тыс. км^2. 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.

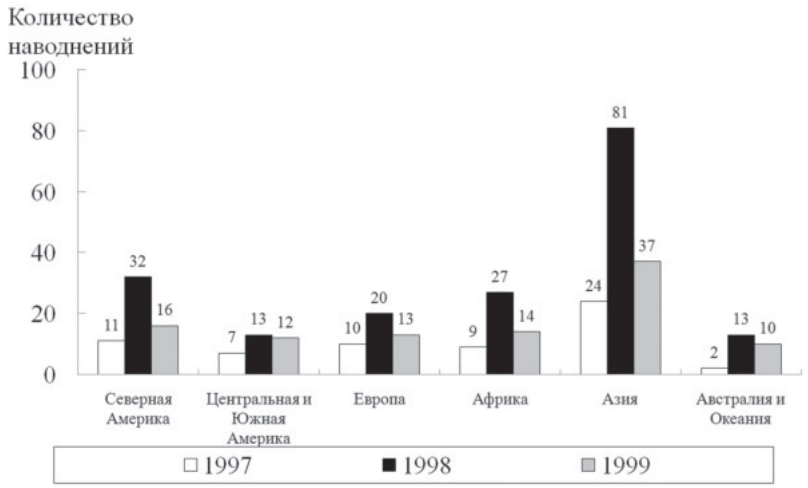


Рис. 1. Распределение наводнений по континентам в 1997–99 гг.

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 ущербов, 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

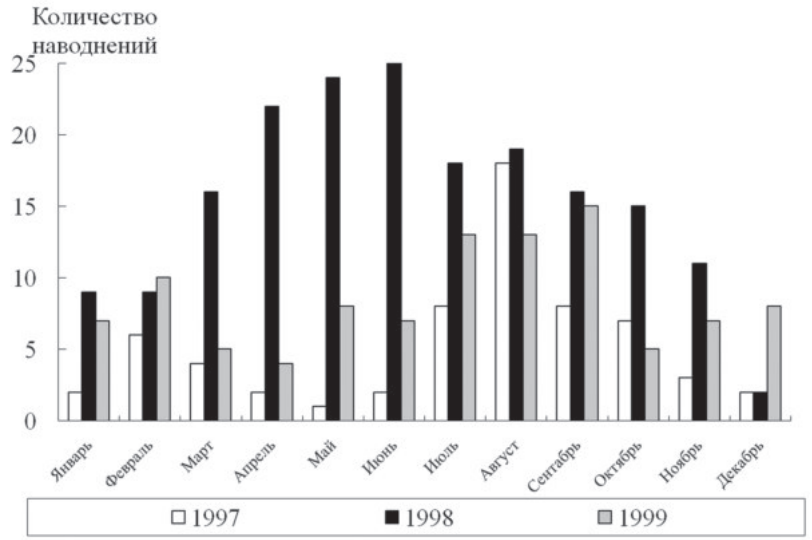


Рис. 2. Распределение наводнений 1997–99 гг. на земном шаре по месяцам

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 большему 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

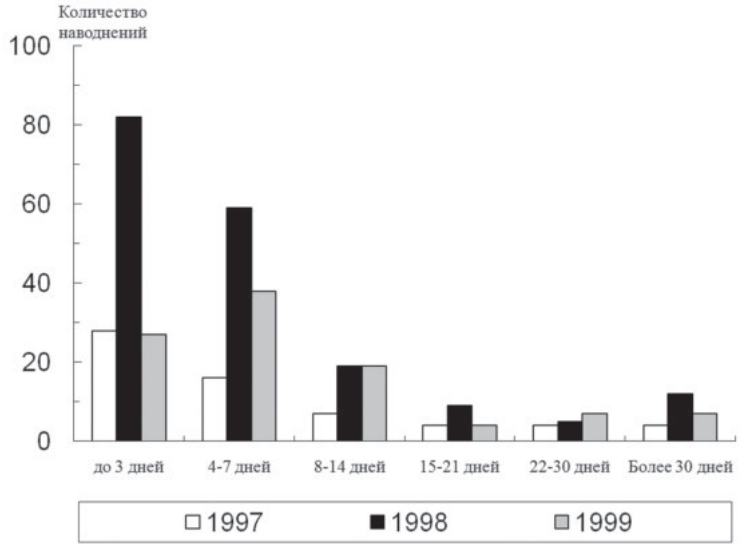


Рис. 3. Распределение наводнений 1997–99 гг. на земном шаре по продолжительности стояния уровня воды

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 относится 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 усложнения 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 картирований 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 км^2, 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, htpp: //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.). Награждён почётным 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 училища 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. Вениционова, 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.

Тяжкая 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. Вениционов (ИВП РАН),
О.П. Авандеева (ИВП РАН),
М.А. Чиганова (ИВП РАН)

Ксенобиотики с лекарственной активностью – новая угроза для окружающей среды[1]

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

Таблица 1

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?-эстрадиол, эстрон, эстриол, 17?-этинилстрадиол
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 бóльшую 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 временны́х 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-

мато-масс-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

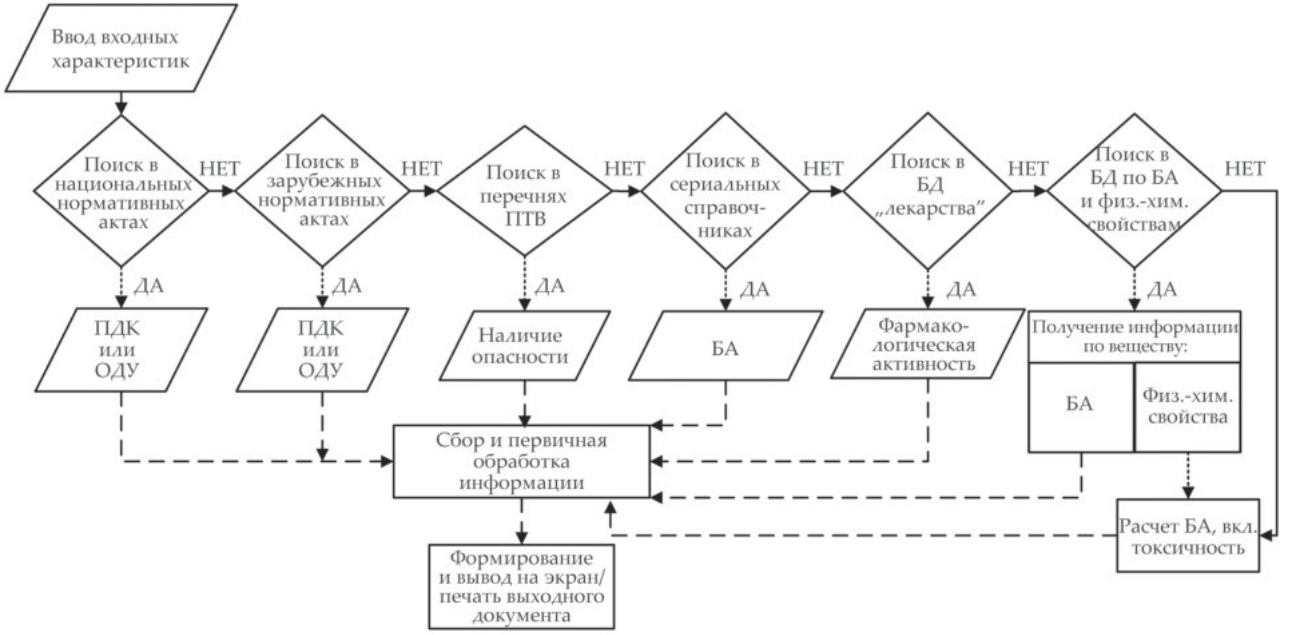


Рис. 1. Алгоритм работы ПРИС по оценке БА.

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

Примечание: под БД «лекарства» понимаются синонимическая БД (содержит химическую структуру, химическое название, синонимы и некоторые свойства, вкл. токсичность) и БД 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 Иваньковском, 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-бутилбензолсульфамид	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

Таблица 3

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 грибков, 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 человеке. Кроме того, через квазифармакологичекую 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.

Таблица 4

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

2-метилбензиловая кислота	9-гексадецен-1-ол	Фенилуксусная кислота
вид активности/вероятность проявления		
· Противоэкземная/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	· Противоэкземная/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 лейкопоэза/0,816 · Противосеборейная/0,819 · Антимутагенная/0,790 · Иммуномодулятор/0,811 · Регулятор липидного обмена/0,790 · Антитромботическая/0,774	· Лечение фобических расстройств/0,911 · Лечение болезни Бехтерева/0,881 · Противосеборейная/0,859 · Лечение пролиферативных заболеваний/0,838 · Иммуностимулятор/0,824 · Противоэкземная/0,810 · Противовоспалительная (лечение заболеваний поджелудочной железы)/0,794 · Лечение алопеции/0,782 · Стимулятор слюноотделения/0,776 · Лечение предраковых 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

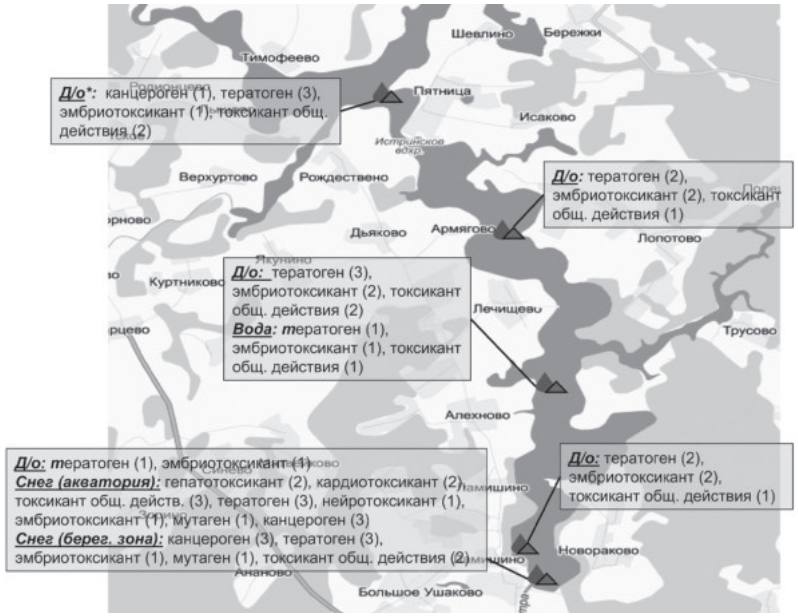


Рис. 2. Фрагмент экотоксикологической карты (на примере Истринского водохранилища): Д/о – донные отложения. В скобках указано количество обнаруженных в данном месте соединений с указанным видом активности.

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	Метиловый эфир 3-гидроксимасляной кислоты	Кампестерол

Таблица 6

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	00,341	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
Фенантрен	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.

Таблица 7

Сравнение законодательных документов о возможном лекарственном загрязнении, имеющихся 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 ксеноиботиков, 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;

Таблица 8

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 вододелителя 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 Георгиевич была подготовлена к печати его коллегами – сотрудниками ИВП АН СССР Л.Ф. Сотниковой, И.О. Сармановым, З.Ф. Волковой, Т.Ф. Макаровой, О.А. Можаевой, 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 рек[1]

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 $x_1, x_2, ..., x_n$ объемом n из некоторой совокупности с известным распределением $P(x)$. Расположим эту выборку в ранжированном порядке и разделим ее на две части: $x_{(1)}, x_{(2)}, ..., x_{(m)} > \xi$ и $x'_{(m+1)}, x'_{m+2}, ..., x'_{(n)} \le \xi$, где ξ – известная точка усечений. Причем численные значения $x_{(1)}, x_{(2)}, ..., x_{(m)}$ известны, а значения $x'_{(m+1)}, x'_{(m+2)}, ..., x'_{(n)}$ не определены. Как только что оговаривалось, в настоящей работе мы принимаем $\xi = x_{me}$ (медиана) и соответственно $m = n/2$. По данным $x_{(1)}, x_{(2)}, ..., x_{(n/2)}$ 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]

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

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

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

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

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

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

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:

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

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:

$$x_{0_{50}} = \int_{x_{me}}^{\infty} x p_{x_{me}}(x; x_0, \sigma) dx, \sigma_{50}^2 = \int_{x_{me}}^{\infty} (x - x_{0_{50}})^2 p_{x_{me}}(x; x_0, \sigma) dx.$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\int_{x_{me}}^{\infty} x p(x; x_0, \sigma) dx = \frac{1}{2} \int_{x_{me}}^{\infty} x p_{x_{me}}(x; x_0, \sigma) dx = x_{0_{50}} / 2 \quad (6.8)$$

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

$$x_0 = x_{0_{50}} - 0{,}80\sigma \quad (6.9)$$

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

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

Рассмотрим каждый из интегралов правой части этого равенства

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

$$= \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{0} z^2 \exp(-z^2/2) dz = \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \left[-z \exp(-z^2/2) \Big|_{-\infty}^{0} + \int_{-\infty}^{0} \exp(-z^2/2) dz \right] = \sigma^2/2 \quad (6.11)$$

(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 $x_{me}=x_0, \infty$

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

(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: $x_0\sim\overline{x}_n, x_{0_{50}}\sim\overline{x}_{n/2}, \sigma\sim s_n, \sigma_{50}\sim s_{n/2}$. Тогда выражения для выборочных параметров $\overline{x}_n$ и s_n окончательно запишутся так:

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

где оценки параметров $\overline{x}_{n/2}$ и $s_{n/2}$ вычисляются методом моментов по верхней половине ряда $x_{(1)}, x_{(2)}, \ldots, x_{(n/2)}, x'_{(n/2+1)}, \ldots, x'_{(n)}$, расположенного в убывающем порядке, по следующим выражениям[3]:

$$\overline{x}_{n/2}=\left(\sum^{n/2}x_i\right)\Big/(n/2), \quad (6.16)$$

$$s_{n/2}=\sqrt{\left[\sum^{n/2}(x_i-\overline{x}_{n/2})^2\right]\Big/(n/2)}. \quad (6.17)$$

[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 $x_1, x_2,..., x_n$ из некоторой совокупности с неизвестными параметрами $\theta_1, \theta_2,..., \theta_k$, находятся следующим образом.

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

$$L = \prod^{n} P(x_i;\theta_1,\theta_2, ..., \theta_k). \tag{6.18}$$

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

$$L = \prod^{n} p(x_i;\theta_1,\theta_2, ..., \theta_k). \tag{6.19}$$

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

$\partial L/\partial\theta_1 = 0, \ \partial L/\partial\theta_2 = 0,..., \partial L/\partial\theta_k = 0$

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

В случае ранжированной выборки, $x_{(1)}, x_{(2)}, \ldots, x_{(m)} > \xi$; $x'(m+1), \ldots, x'(n) \le \xi$ 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 $x_{(1)}, x_{(2)}, \ldots, x_{(m)}$ мы можем поставить в соответствии плотность вероятностей $p(x_1), p(x_2),..., p(x_m)$, а членам нижней части выборки $x'(m+1),..., x'(n)$ – одинаковую, вероятность $P(x \le \xi)$, так как о каждом из них нам известно, что он попадает в область $\xi \ge x > -\infty$. В результате функция правдоподобия в данном случае выразится так:

$$L = \left[P(\xi)\right]^{n-m} \prod^{m} p(x_i;\theta_1,\theta_2, ..., \theta_k), \tag{6.20}$$

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

При нахождении max L, должно учитываться, что вероятность $P(x \le \xi)$ зависит от параметров $\theta_1, \theta_2, ..., \theta_k$; 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

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

или

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

где $\Phi(x_{me}) = P(x \le x_{me})$

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

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

Вычислим . Имеем:

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

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

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

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

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

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

Аналогично

$$\partial \ln L/(n/2)\partial\sigma=\Phi'_\sigma(x_{me})/\Phi(x_{me})-\frac{1}{\sigma}+ \\ +\left[\sum^{n/2}(x_i-x_0)^2\right]\Big/\sigma^3(n/2)=0. \tag{6.26}$$

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

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

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

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

$$\sigma^2=\left[\sum^{n/2}(x_i-x_0)^2\right]\Big/(n/2)=\left[\sum^{n/2}(x_i-x_{0_{50}})^2\right]\Big/(n/2)+(x_{0_{50}}-x_0)^2, \\ \sigma\sim s_n=\frac{s_{n/2}}{0{,}60}, \tag{6.28}$$

т. е. с учетом (6.25)

где $s_{n/2}=\sqrt{\left[\sum^{n/2}(x_i-\overline{x}_{n/2})^2\right]\Big/(n/2)}$ – 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 $x_1, x_2, \ldots, x_n$ асимптотическое значение дисперсии, скажем оценки θ_1^*, определяется выражениями (4.6) и (4.7). Но очевидно, что, например:

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

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

Введем обозначения

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

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

$$D\theta_1^* = -\frac{1}{1-\rho^2(\theta_{12}^*,\theta^*)} \frac{1}{n\phi_{11}}, \tag{6.29}$$

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

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)

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

Откуда

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

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

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

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

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

Учитывая (6.24), получим

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

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

Аналогично учитывая (6.31), запишем

$$\frac{\partial^2 \ln L}{n\partial x_0 \partial\sigma} = \frac{\Phi'_{x_0}\sigma(x_{me})\,\Phi(x_{me}) - \Phi'_{x_0}(x_{me})\Phi'_{\sigma}(x_{me})}{2\left[\Phi(x_{me})\right]^2} - \qquad (6.36)$$

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

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

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

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

$$\frac{\partial^2 \ln L}{n\partial x_0}\partial\sigma = \frac{0{,}40}{\sigma^2} - \frac{2}{\sigma^3}\frac{\left[\sum^{n/2}(x_i - x_0)\right]}{n}$$

$$\text{и} \quad \varphi_{1_2}(x_{me}) = \lim_{\mathrm{n}\to\infty}\frac{1}{n}\frac{\partial^2 \ln L}{\partial x_0 \partial\sigma} = -\frac{0{,}40}{\sigma^2}\ . \qquad (6.38)$$

Аналогично (см. (6.26))

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

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

$$\text{и} \qquad -\frac{3}{\sigma^4}\left[\sum^{n/2}(x_i - x_0)\right]\Big/ n. \tag{6.40}$$

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

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

Учитывая (6.27), найдем

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

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

(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

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

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

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:

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

$$+ 2\rho(\bar{x}_n, s_n)\sigma(x_n)\sigma(s_n)\left(\frac{\partial x_p}{\partial x_0}\right)\left(\frac{\partial x_p}{\partial \sigma}\right)$$

Но $x_p = x_0 + z_p$, 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

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

Таблица 32

Выборочное стандартное отклонение оценок ординат кривых полного и усеченного распределений[4]

Распределение	σ(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 несильно – 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_υ методом моментов

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

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

Требуется найти соотношение между моментными оценками параметров исходного распределения (1.2) x_0 и C_υ и оценками соответствующих параметров усеченного распределения $x_{0_{50}}$ и $C_{\upsilon_{50}}$ определяемых выражениями:

$$x_{0_{50}} = \int_{x_{me}}^{\infty} x p_{x_{me}}(x; x_0, \gamma) dx \qquad (6.48), (6.49)$$

$$C_{\upsilon_{50}} = \frac{\sigma_{50}}{x_{0_{50}}} \qquad (6.50)$$

Найдем выражение для моментной оценки среднего x_0. Запишем по определению

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

Вычислим каждый из интегралов правой части этого равенства

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

$$=\frac{\gamma^{\gamma}}{\Gamma(\gamma)}\int_0^{x_{me}}\left(\frac{x}{x_0}\right)^{\gamma}\exp\left(\frac{-\gamma x}{x_0}\right)dx \qquad (6.52)$$

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

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

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

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

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:

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

где введено обозначение

$$\phi(C_{\upsilon})=[\,1+(2/\gamma)(x_{me}/x_0)\;p(x_{me}/x_0)]^{-1}. \qquad (6.56)$$

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

Применительно к выборочным параметрам выражение (6.55) запишется так:

$$x_0\sim\overline{x}_n=\overline{x}_{n/2}\phi(C_{\upsilon}), \qquad (6.57)$$

где $\bar{x}_n$ – оценка для среднего x_0, $\bar{x}_{n/2}=\left(\sum^{n/2} x_i\right)\Big/(n/2)$ – среднее арифметическое верхней половины ранжированного в убывающем порядке ряда, принимаемое в качестве оценки для $x_{0_{50}}$, а значение $\varphi(C_\upsilon)$ берется из таблицы, предварительно составленной по выражению (6.56).

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

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

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

Поэтому $p(x_{me})=\dfrac{p(0)}{\sigma}=\dfrac{0{,}40}{\sigma}$, т.е. $x_0\to\dfrac{x_{0_{50}}}{1+0{,}80C_\upsilon}$.

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_υ и $C_{\upsilon_{50}}$. 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

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

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);

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

(интеграл был вычислен выше);

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

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

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

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

$$+x_0^2\int_{x_{me}}^{\infty}p(x)dx = \int_{x_{me}}^{\infty}(x-x_{0_{50}})^2p(x)dx + \frac{1}{2}(x_{0_{50}}-x_0)^2 = \qquad (6.64)$$

$$= \frac{1}{2}\int_{x_{me}}^{\infty}(x-x_{0_{50}})p_{x_{me}}(x)dx + \frac{1}{2}(x_{0_{50}}-x_0) = \sigma_{50}^2/2 + (x_{0_{50}}-x_0)^2/2.$$

Объединяем интегралы (6.63) и (6.64):

$$\sigma^2 = (x_0^2/2\gamma)\left\{1+2(x_{me}/x_0)p(x_{me}/x_0)\left[1-(x_{me}/x_0)-1/\gamma\right]\right\} +$$

$$+\sigma_{50}^2/2 + (x_{0_{50}}-x_0)^2/2.$$

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

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

Этим соотношением определяется зависимость между коэффициентами изменчивости усеченного распределения $C_{\upsilon_{50}}$ и полного распределения C_υ.

При оперировании с выборочными значениями $C_{\upsilon_{n/2}}$ и C_{υ_n} в соотношении (6.65) производится следующая замена: $C_{\upsilon_{50}} \sim C_{\upsilon_{n/2}}$ и $C_\upsilon \sim C_{\upsilon_n}$.

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

$$C_{\upsilon_{n/2}}=\sqrt{\left[\sum^{n/2}(x_i-\overline{x}_{n/2})^2\right]\Big/(n/2)\overline{x}^2_{n/2}} \qquad (6.66)$$

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

Как и при анализе средних значений $x_{0_{50}}$ и x_0 рассмотрим предельный случай, когда $C_\upsilon\to 0$, т. е. когда гамма-распределение стремится к нормальному.

Полагая $\left(\frac{x_{me}}{x_0}\right)\to 1$, $p\left(\frac{x_{me}}{x_0}\right)=0{,}40C_\upsilon$, из зависимости (6.65) получим $C_{\upsilon_{50}}=\frac{0{,}60\ C_\upsilon}{1+0{,}80C_\upsilon}$. Но при $C_\upsilon\to 0$ (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_υ и $C_{\upsilon_{50}}$.

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

$$L=\left[F(x_{me})\right]^{n/2}\left[\gamma^\gamma/\Gamma(\gamma)x_0\right]^{n/2}\exp\left[-\gamma\sum^{n/2}(x_i/x_0)\right]\prod^{n/2}(x/x_0)^{\gamma-1} \qquad (6.67)$$

и

$$\ln L=(n/2)\ln F(x_{me})+(n/2)\gamma\ln\gamma-(n/2)\ln\Gamma(\gamma)-(n/2)\ln x_0-$$
$$-\gamma\sum^{n/2}(x_i/x_0)+(\gamma-1)\sum^{n/2}\ln(x_i/x_0), \qquad (6.68)$$

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

Найдем оценку правдоподобия для среднего x_0

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

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

$$F'_{x_0}(x_{me}) = \int_0^{x_{me}} p'_{x_0}(x)dx = \tag{6.70}$$

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

(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

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

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

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

(функция $\varphi(C_v)$ 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 $x_{0_{50}}$, как и для неусеченного распределения [10, 61], служит среднее арифметическое.

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

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

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

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

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):

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

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

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

при $t=\gamma(x/x_0)$.

С учетом полученного выражения (6.76):

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

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_υ, а именно:

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

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

$t=const \quad \Gamma_t'(\gamma)=\int_0^t z^{\gamma-1}\ln z\exp(-z)dz$, 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_υ определяется через статистику λ_2.

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

При составлении приводимой ниже таблицы было использовано следующее разложение для $\Gamma'_{t=const}(\gamma)$

$$\Gamma_t(\gamma)=\int_0^t z^{\gamma-1}\exp(-z)\,dz=\sum_{k=0}^{\infty}\left[\frac{(-1)^k\,t^{k+\gamma}}{k!\,(k+\gamma)}\right]. \tag{6.80}$$

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

$$\Gamma'_{t=const}(\gamma)=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k t^{k+\gamma}}{k!(k+\gamma)^2}\left[(k+1)\ln t-1\right]. \tag{6.81}$$

Порядок расчетов при использовании усеченного гамма-распределения очевиден: сначала по выражению (6.79) вычисляется оценка C_υ, а затем по выражению (6.71) находится оценка x_0. Значения зависимостей[5] $\varphi(C_\upsilon)$ и $C_\upsilon=f(\lambda_{2_{n/2}})$ 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_υ

Установление выражений для стандартных ошибок оценок правдоподобия параметров: среднего x_0 и коэффициента C_υ, 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 З.Ф. Волковой на БЭСМ-3М.

Таблица 34

Значения функции $C_\upsilon = f(\lambda_{2_{n/2}})$

C_υ	$\lambda_{2_{n/2}}$									
	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 $\sigma(\bar{x}_n)$, $\sigma(C^*_{\upsilon_n})$ 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_υ=0,50 и 1,0. По каждой выборке были вычислены в обычном порядке оценки параметров x_0 и C_υ 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 приближенны (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^*_ν 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_ν 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_ν методом моментов;
- усеченное гамма-распределение при оценке его параметров x_0 и C_ν 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-

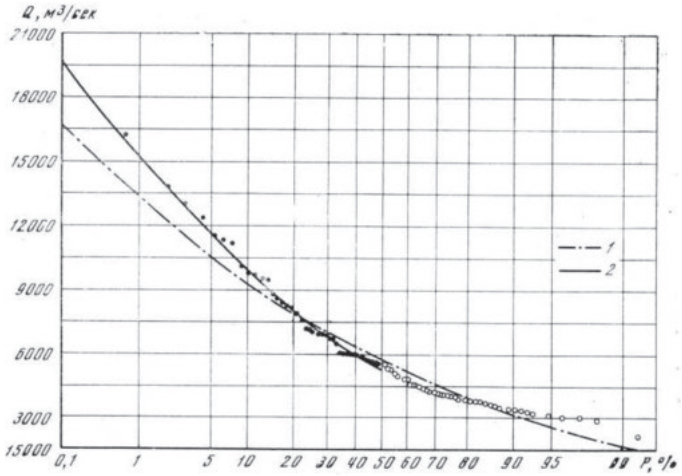
Таблица 36

x_i м^3/сек (в убывающем порядке)	Годы	$\frac{x_i}{\overline{x}_{n/2}}$	$\lg\frac{x_i}{\overline{x}_{n/2}}$	x^i м^3/ сек (в убывающем порядке)	Годы	$\frac{x_i}{\overline{x}_{n/2}}$	$\lg\frac{x_i}{\overline{x}_{n/2}}$
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 $x_{n/2}$ (см. выражение (6.71)) и статистику $\lambda_{2_{n/2}}$ (см. выражение (6.79)); подготовительные вычисления даны в табл. 36:

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



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

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

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

Далее, зная среднее и определив с помощью вычисленного значения C_υ по табл. 34 функцию $[(\varphi(C)]_\upsilon$), по выражению (6.7) находим значение среднего x_n:

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

По полученным значениям $\overline{x}_n$ и C_{υ_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 транспортного 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 d 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 биофизических 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 покрова[1]

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

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

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 $Q_р = Q_р(z)$. 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 $z=h_к$ (нижняя граница корнеобитаемого слоя почвы), получим:

$$dV/dt = Q(0) - Q(h_к) - E_п(0) + E_п(h_к) - Q_р(0) + Q_р(h_к), \qquad (2)$$

Величина $Q_р(h_к)$ по условию, вытекающему из понятия о корнеобитаемом слое почвы, равна нулю. Величина $E_п(h_к)$ 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 $E_п(h_к)=0$.

Вода, поглощаемая корнями растений, далее поступает в стебли (стволы) и листья, где расходуется на транспирацию. Для надземной 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

$$dV_р/dt = Q_р(0) - E_т, \quad (3)$$

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

Производная $\partial V_р/\partial t$ 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 $Q_р(0) = E_т$.

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

$$dV/dt = Q(0) - Q(h_к) - E_п - E_т. \quad (4)$$

Если левую и правую части (4) поделить на плотность воды ρ=1 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:

$$dV_с/dt = H - E^*_с - Q(0) - Y_с, \quad (5)$$

в котором $V_с$ – 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; $E^*_с$ – испарение снега в зимний период (в период снеготаяния, по имеющимся оценкам [9], испарение снега весьма невелико и им можно пренебречь); $Y_с$ – поверхностный и склоновый сток.

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

$$H = Q(0) + Y_с. \quad (6)$$

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

$$dV/dt = H - E_с - Q(h_к) - Y_с;\ E_с = E_п + E_т. \quad (7)$$

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 бездождные 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-

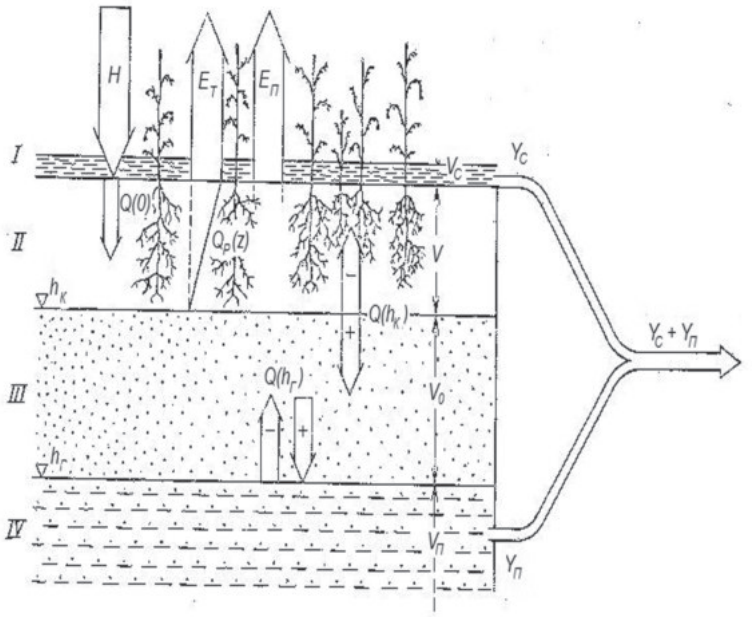


Рис. 1. Схема взаимного обмена вод суши для гипотетического речного бассейна.
I – поверхностные воды, II – корнеобитаемый слой почвы, III – зона аэрации, IV – подземные воды

зуемой 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:

$$dV_а/dt = Q(h_к) - Q(h_г). \quad (8)$$

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

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

$$dV_п/dt = Q(h_г) - Y_п, \quad (9)$$

в котором $V_п$ – запасы подземных вод, $Y_п$ – подземная составляющая речного стока. В ряде случаев, главным образом при проходе паводков, величина $Y_п$ 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 $Q(h_к)$, означающая вертикальный водообмен между корнеобитаемый 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 $Q(h_г)$ 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 $Q(h_г)$ он в конечном счете полностью расходуется на испарение, равносильно по меньшей мере утверждению, согласно которому величина производной $dV_а/dt$ в (8) всегда равна нулю. Учитывая сказанное, в дальнейшем вместо термина «испарение грунтовых вод» будет использоваться термин «подпитывание зоны аэрации».

Величину $E_с$, 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) $Q(h_к)$ и $Q(h_г)$ приводит к уравнению

$$dV^*/dt = H - E_с - (Y_с + Y_п), \qquad (10)$$
$$V^* = V_с + V + V_а + V_п.$$

В (10) для сокращения записей и большей наглядности опущен член $E^*_с$, 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 $E_т$ к транспирации, отвечающей оптимальной влажности почвы $E_{то}$. Обозначим это отношение через $\eta_т = E_т/E_{то}$.

Величина параметра $\eta_т$ 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 $\eta_т$ является простым и наглядным показателем водообеспеченности растительного покрова. Разность $1-\eta_т$ может служить показателем засухи.

Второй параметр, характеризующий структуру ресурсов почвенных вод, обозначим через $\eta_р$ и, согласно высказанным соображениям, представим его в виде $\eta_р = E_т/E_с$.

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

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

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 специфичного 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 $h_к$, 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 посевы 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 несущественное 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, характеризуемых 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 урожаев. 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 непроизводительно используемых 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 непродуктивного 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 CO2, 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.: Гидрометеоиздат, 1973, 328 с.
9. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеоиздат, 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 (гг. 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 «Гидрометеоиздата».

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.: Гидрометеоздат 1970.236с.; 2-е изд. 1979, 207 с.; Жизнь наших рек. Л.: Гидрометеоздат, 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 использование[1]

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 земледельческих 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 км^3 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 км^2 территории страны стекает воды 6,3 л/с, или 197 тыс. м^3/год. Среднемноголетний сток всех рек СССР составляет 4740 км^3/год, из них около 327 км^3/год (7,1%) – приток с зарубежных территорий, около 31 км^3/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 среднемноголетнего 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 водосбора, тыс. км²	Длина, км	Средний годовой сток*, км³
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	Индигирка	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	Пясина	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 ГГИ, 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 гидроэнергостанциями 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 ущербов 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 увеличиваются 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. $м^2$ в год против 16 тыс. $м^3$ 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. $м^3$ 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 км^3, а приток извне – 67 км^3, в Узбекской ССР – соответственно 11 и 106 км^3, в Молдавской ССР – 0,8 и 11 км^3, 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 строящиеся, в том числе затопленная суша	135 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: дли 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, закреплением 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 голове канала, $м^3/с$	Объем переброски, $км^3$/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. Амударьи)	Преимущественно орошение
2	1937	Канал им. Москвы	128	95	2,3	р.Волга (Иваньковское водохранилище)	Водоснабжение г. Москвы, водный транспорт, рекреация, обводнение Подмосковья, 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. Амударьи	Преимущественно орошение
7	1940	Канал Совет-Яб	62	70	2,1	р. Амударьи	Преимущественно орошение

Продолжение таблицы 3

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
8	1946 (1709)	Вышневолоцкая система	18	32	0,9	Бассейн р. Мсты	Питание Верхней Волги (последняя реконструкция самого старого в России воднотранспортного соединения через водораздел)
9	1948	Невинномысский канал (Кубань-Егорлыкско-Манычская 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 ЕТС
11	1957	Большой Ставропольский канал	159		0,3–5,7	Бассейны рек Кубани и Дона	Орошение, обводнение, водоснабжение1
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 (очередями)	403	215	5,5	Водохранилища 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	Бассейн р. Куры	Орошение
17	1961	Терско-Кумский канал-Терско-Кумская оросительная система (очередями)	150	100	0,3-1,0	р. Терек	Преимущественно орошение, обводнение
18	1961	Канал Днепр-Кривой Рог	42	41	1,3	Водохранилища 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	Бассейн р. Куры	Преимущественно орошение
21	1966	Каракумский канал им. В.И. Ленина (очередями)	1100	198	13,0	р. Амударья	Преимущественно орошение, судоходство до г. Ашхабада – 800 км
22	1966	Канал Волга – Уводь	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

Продолжение таблицы 3

24	1970	Большой Андижанский 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		Кизкетен, 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 сторону[2]. 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

Водохранилище	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 Иваньковской, Угличской, Рыбинской и Горьковской ГЭС «расход» земли на 1 м напора составил 30 и 20 км^2 на Иваньковской и Угличской, а на Рыбинском – 240 км^2; плотина здесь расположена ниже слияния трех рек – Волги, Мологи и lШексны. На Горьковском водохранилище было занято 100 км^2 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 км^2, 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 водохозяйсгвенных 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.

Водохранилища 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.: Гидрометеоиздат. 1975. С. 6–17.

2. Авакян А.Б. Водохранилища 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.: Гидрометеоиздат. 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.: Гидрометеоиздат. 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.: Гидрометеоиздат. 1986. С. 49-51.

10. Вендров С.Л. Жизнь наших рек. Л.: Гидрометеоиздат. 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.: Гидрометеоиздат. 1986. С. 119–151.

18. Гладков НА. 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., Черкавский СК., Шикломанов И.А. Основные итоги и перспективы развития гидрологии в свете решений XXУН съезда КПСС // Генерал. докл. V Всесоюз. гидрол. съезда. Л.: Гидрометеоиздат. 1986. С. 3–59.

21. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л: Гидрометеоиздат. 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.: Гидрометеоиздат. 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.: Гидрометеоиздат. 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.: Гидрометеоиздат. 1976. 77 с.

Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеоиздат. 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 Кронштатского 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 редколлегией 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, убеждённость 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», «Топливно-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 отдаленную перспективу, улучшения экологического состояния территории.

Г.В. Воропаевым были установлены физико-географические закономерности формирования водопотребления, что позволило по-новому 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. Исмайыловым, 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 газоносности, 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 ресурсов[1]

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.

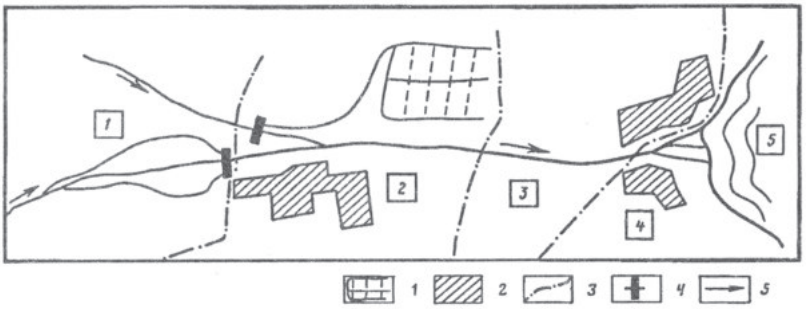


Рис. 1. Схема водохозяйственного бассейна:
цифры в квадратах - субъекты водопользования: *1* – орошаемые земли, *2* – промышленные и городские объекты, *3* – административные границы, *4* – гидротехнические сооружения, *5* – направление течения реки

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 расходованием 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 использование 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) получат 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 выполнить 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 первостепенно. 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 вододеления 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 принижено, 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 водообеспечения[1]

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 обусловливает 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. Агролесомелиоративные 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 приходных 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 несущественными 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 талыми 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 водоохранные 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, обусловливающим 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 переброскими 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 боìльшим, 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.

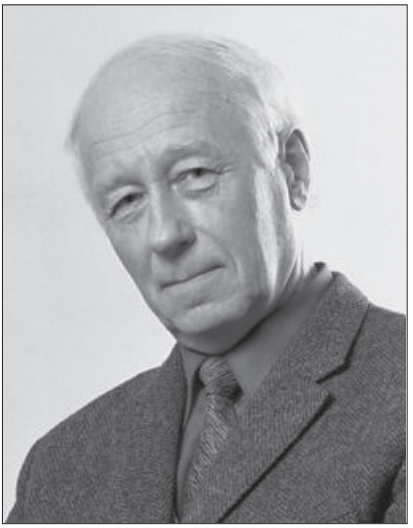
Обобщая изложенное, можно сделать вывод, что основными направлениями дальнейших исследований в области изучения, рационального использования и охраны водных ресурсов являются:

- 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 околоводных 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. Ширшова 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 моря[1]

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 Кандалакшском 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. Толстиков. 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 elektronics» (США)
Quanta	Температура, °С электропроводность, мСм/см Содерж. кислорода, мгО/л pH 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. Распреснение 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				CTD-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 RCM-4 TR-1	12–15.VI 12–14.VI 12–15.VI	64°55,85’ 64°55,85’ 64°55,85’	35°10,55’ 35°10,55’ 35°10,55’	ТС*	12–15 июня	65
О-ва Заяцкие 16-17 июня 2000 г.						
WLR RCM-4 TR-1	16–17.VI 16–17.VI 16–17.VI	64°59’ 64°59’ 64°59’	35°39’ 35°39’ 35°39’	ТС*	15–17 июня	23
Губа Чупа, 12-18 сентября 2000 г.						
WLR RCM-4 TR-1 TR-1 WLR TR-1 TR-1	12–15.IX 16–18.IX 12–15.IX 12–15.IX 16–18.IX 16–18.IX 17–18.IX	66°17,8’ 66°17,8’ 66°17,8’ 66°17,8’ 66°17,4’ 66°17,4’ 66°17,4’	33°44,8’ 33°44,8’ 33°44,8’ 33°44,8’ 33°37,1’ 33°37,1’ 33°37,1’	ТС*	14–17 сентября	12
Губа Чупа, 18-26 марта 2001 г.						
WLR RCM-4 TR-1	21–26.III 21–26.III 21–26.III	66°19’52” 66°19’52» 66°19’52”	33°39’53” 33°39’53” 33°39’53”	ТС*	21–26 марта	11
Устье р. Кеми, 4-7 июля 2001 г.						
TR-1 RCM-4 WLR	4–7.VII 4–7.VII 4–7.VII	65°00,15’ 65°00,15’ 65°00,15’	34°49,58’ 34°49,58’ 34°49,58’	Sea-bird	4–6 июля	17
Онежский залив, 10-14 июля 2001 г.						
RCM-4 RCM-4	11–12.VII 13–15.VII	64°50,89’ 64°54,80’	35°47,37’ 35°09,27’	Sea-bird	10–14 июля	52
Онежский залив, 2-6 сентября 2001 г.						
RCM-4 RCM-4	5.IX 5–6.IX	65°05,42’ 65°02,53’	35°11,42’ 35°04,44’	Sea-bird, Quanta	2–6 сентября	28

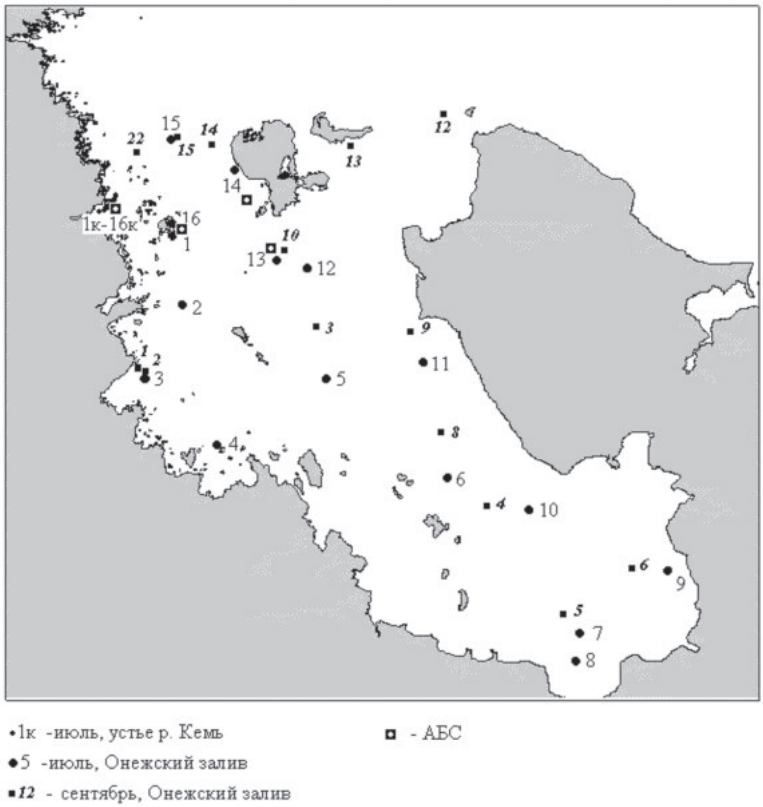


Рис. 2. Схема расположения гидрологических станций в Онежском заливе Белого моря (июль, сентябрь 2000–2001 гг.)

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°С, а в придонных слоях – от 8,7 до 11,6°С (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

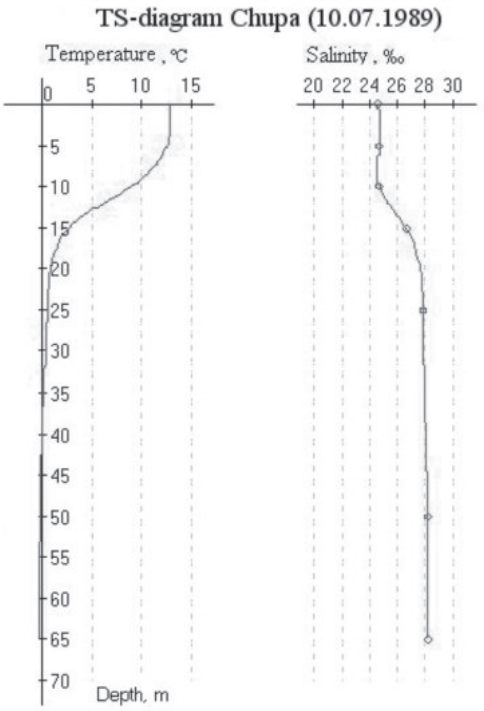


Рис. 3. Профили температуры и солености в Керетской губе в сентябре 2000 г.

и интенсивным прогревом мелководья. Распространение речных вод по акватории эстуария отражалось и на распределении солености. Наименьшие ее величины отмечались вблизи устья на поверхности воды и соответствовали 8,1о/оо. С увеличением глубины она возрастала и достигала в придонных слоях 18–26о/оо. 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 26,2о/оо, 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 1,2о/оо.

Формирование полей температуры и солености в Онежском заливе и их пространственно-временная изменчивость определяются природными условиями (морфометрическими особенностя-

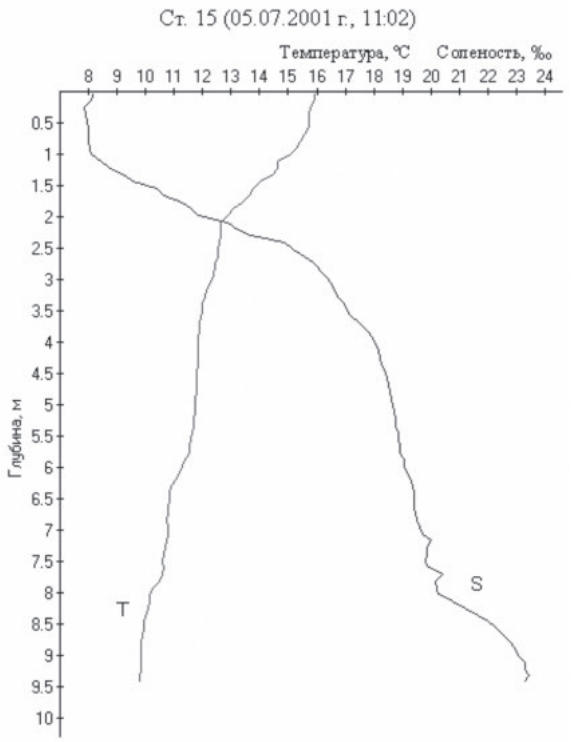


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры и солености в эстуарии р. Кемь

ми 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 происхо-

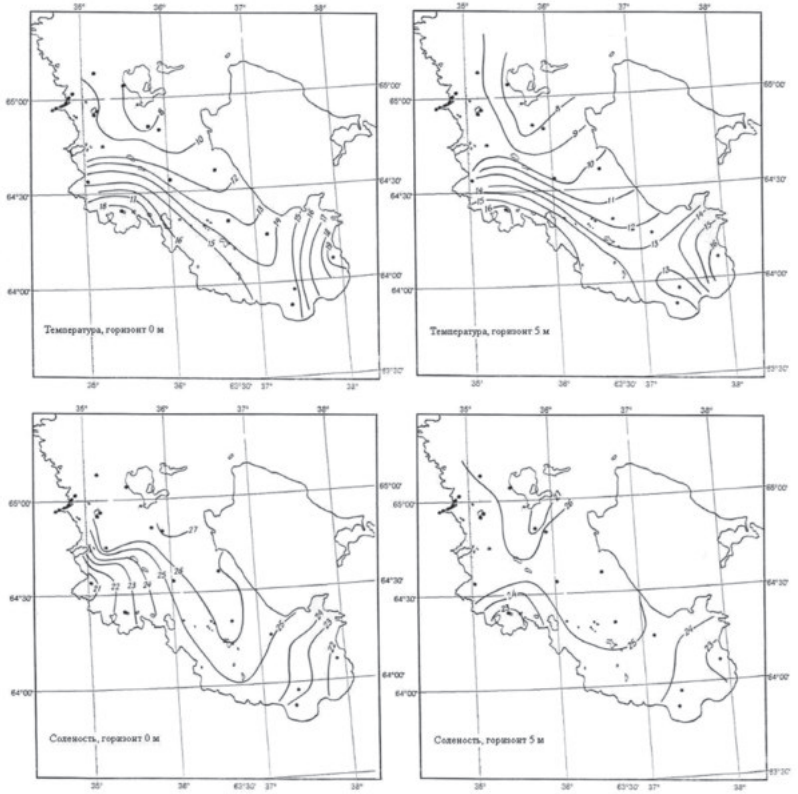


Рис.5. Карты распределения температуры воды и солености в Онежском заливе Белого моря на горизонтах 0 и 5 м. 10–14 июля 2001 г.

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 солености.

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

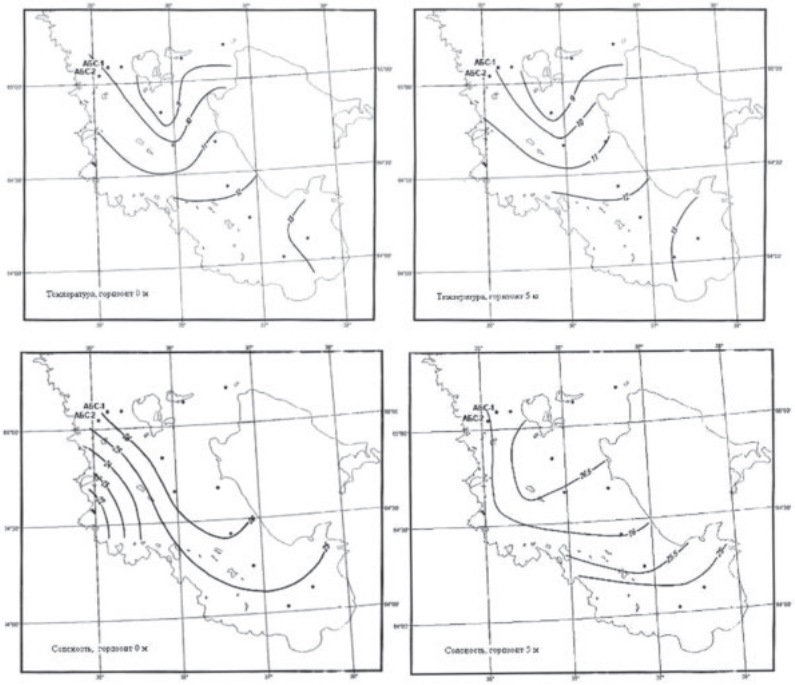


Рис. 6. Карты распределения температуры воды и солености в Онежском заливе Белого моря на горизонтах 0 и 5 м. 02–06 сентября 2001 г.

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 Рабочеостровска). Наибольшие амплитуды колебаний уровня были зафиксированы в Керетской губе на станциях Б1 и Б2

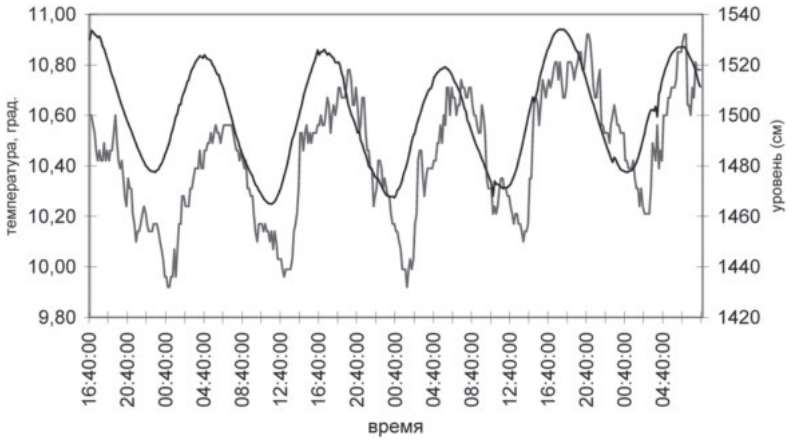


Рис. 7. Колебания уровенной поверхности и температуры воды в придонном слое. 12–15 июля 2000 г. О-ва Кузова

(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 флуктуаций.

Изменчивость температуры на различных горизонтах в условиях стратификации вод свидетельствует о внутриволновых колебаниях

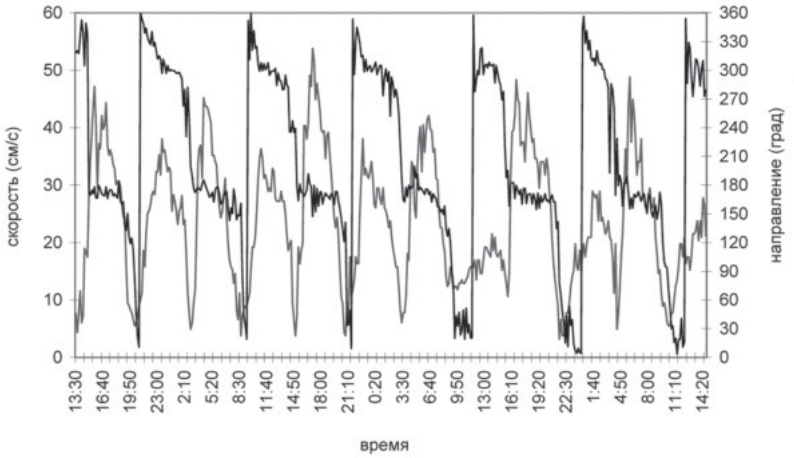


Рис. 8. Направления и скорости течений на АБС-1 4–7 июля 2001 г. Горизонт 8 м.

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 квазиоднордного 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

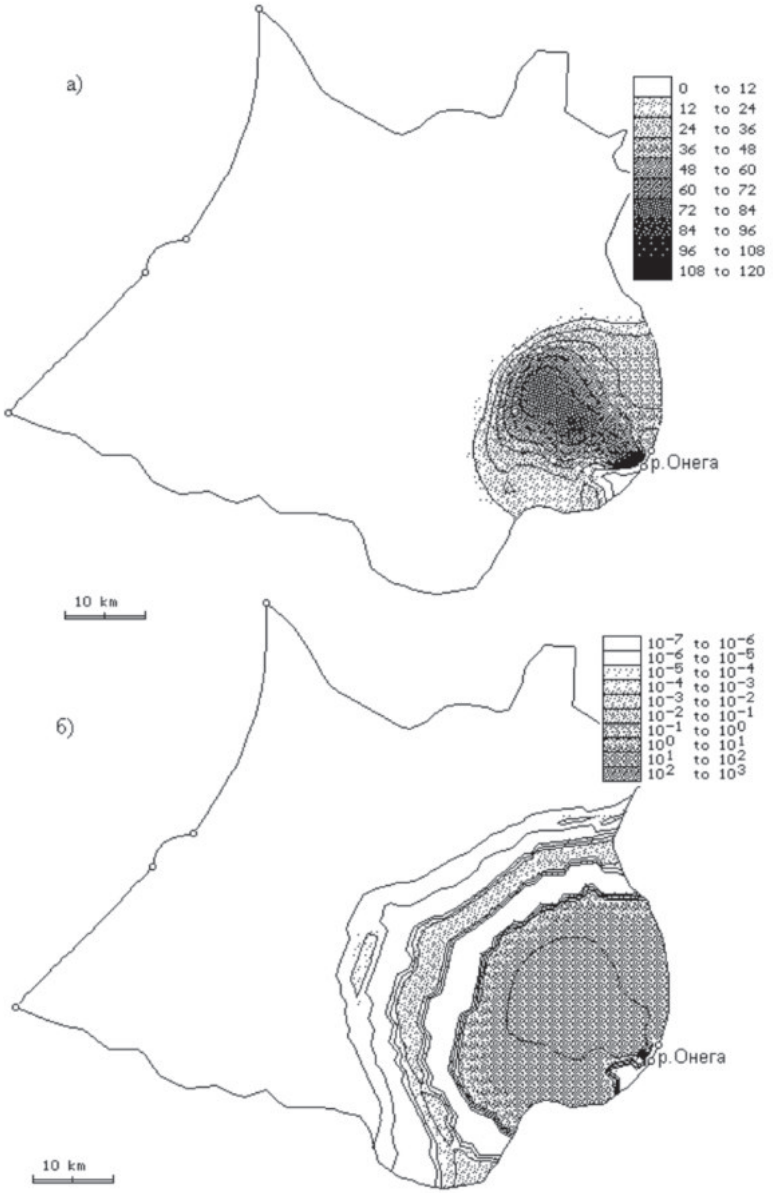


Рис. 9. Концентрация примеси в вершине Онежского залива на 60 часов расчетного времени при расходе реки 2800 м3/с (а – обычный масштаб, б – логарифмический масштаб)

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.

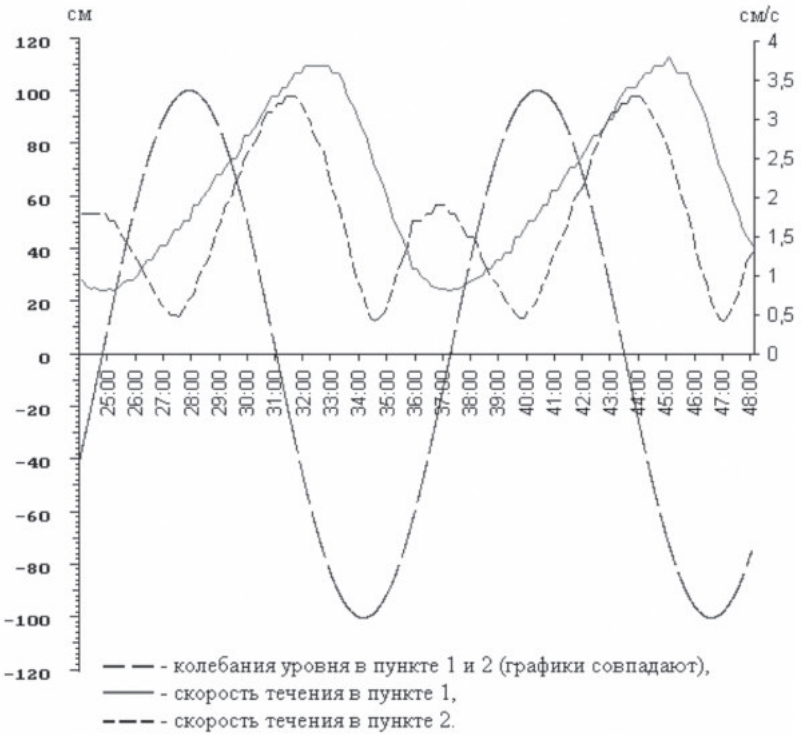


Рис. 11. Временной ход колебаний уровня и изменения скорости течения (амплитуда сизигийного прилива 100 см, расход реки – 23 м3/с)

Для района эстуария Керети оценивалось влияние различных расходов реки на приливные колебания уровня и течений при квадратурном 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 М2, 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

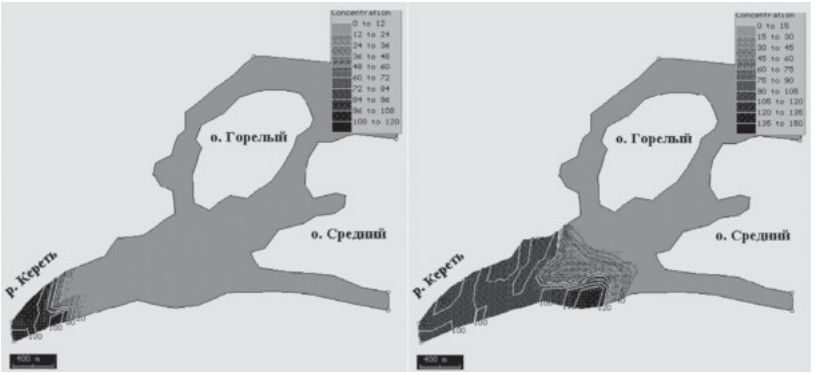


Рис. 12. Концентрация примеси (амплитуда сизигийного прилива 100 см, расход реки максимальный – 100 м3/с) для 26 ч расчетного времени (слева) и 36 ч (справа)

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.

Расход реки / Амплитуда прилива	100 м^3/с	23 м^3/с	9 м^3/с
100 см	2,5 км	1,2 км	0,8 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 орографии 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-

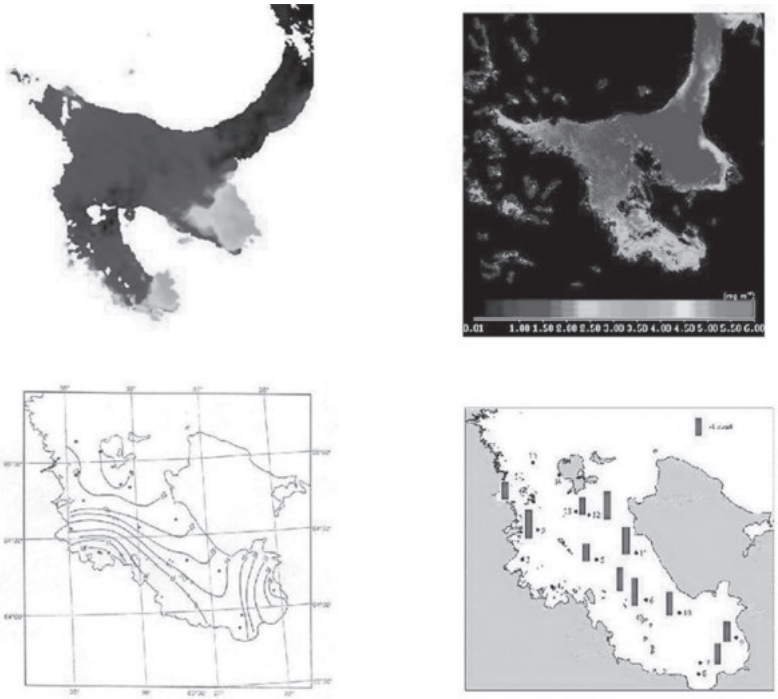


Рис. 13. Распределение температуры воды на поверхности моря 10 июня 2001 г. по данным НОАА и измеренные с НИС «Эколог», распределение хлорофилла-а по данным со спутника SeaWifs и по результатам измерений с борта НИС «Эколог»

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 SeaWifs.

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. Здоровеннов 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. Гидрометеоиздат. 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 защитить 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. Многое 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 управления[1]

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 специфические 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 – континуальность 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 «экотонизации 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 экотонов. 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 экотонов».

Пространственные и генетические типы экотонов.

В первичном понимании по Ф. Клементсу [3] экотоны представляют собой контактные «микрозоны» 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 биогеоценотическую 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 аспектирует 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 слагают (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 выдвижения сообществом разных, наиболее подходящих моменту, видов-функционеров для осуществления ими определенной биогеоценотической роли. Становление этого оригинального достаточно древнего механизма устойчивости геоэкотонной 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 геоэкотонной 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 (прутняково-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-злаковое сообщество (Agropyron+Stipa), иногда с участием кустарников – таволг (Spiraea) – зверобойной и городчатой, 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 внутриэкосистемных 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 ценозообразователем, 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 биогеоценостического 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 дигрессиям. 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 пасммофитов, 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 межгрядовых понижениях в песках в ирригационных раонах, 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. Неполночленность 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 дополнительности 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 дополнительности видов и принцип усложнения вертикальной структуры сообществ наиболее эффективно могут быть применены для неполночленных 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 биомелиорацией 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 зарегулированием 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 зарегулированным 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 (Agama sanguinolenta, Erimas grammica, E. macolata, E. lanceolata, E. arguta, Phinocephalus incospiqua, Ph. mistaceus) и змею (Taphrametaponlincolatum) и 6 видов млекопитающих (Merionesta mariscinus, M. meridianus, Crocidura sauveolens, Dipus sagitta, Paradopus lichtensteini, Lepus tolai) сохранились лишь: из рептилий 1 вид – Agama sanguinolenta, из млекопитающих – 2 вида: Merionesta mariscinus и Lepus tolai.

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 межрусловых 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 биопродукцию и осуществляют роль биофильтров и регуляторов потока вещества между сушей и водоемом. Управление уровнем водоемов, а также состоянием биокомплексов 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 – Charadriusalexandrius,кулика-сороки –Hamaetopusostralegus,анаорошаемыхмассивахземель –гнездатравника –Tringatotanus,ходулочника –Himantopus himantopus,луговойтиркушки –Glareolapratincolaибелохвостойпигалицы – Vanellochettusialeucura,чтоприводиткудлинениюпериодаразмножениязасчет 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-ценозообразователя в определенную фенофазу его развития, например, до плодоношения;

Последнее можно рассмотреть на примере практически моноговидового 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 парцеллесообществачерногосаксаула –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 inqueta, 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 увлажненности 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 сообщества, 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 несфорированностью, 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 – Salicorniaeuropaea, Suaedaaltissima) иреликтовых, 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 гибридизации 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 биогеоценотического и ландшафтного покрова

Множественные нарушения структуры и условий нормального функционирования элементарных экосистем, целостности и континуальности биогеоценотического 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

Таблица 1

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 биогеоценотического континуума	3. Усиление эрозионных 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 самораспространения очагов нарушения окружающей среды	5. Сокращение биогеоценотических циклов до субклимакса и дискли-макса. Биотическая структура экосистем становится «моложе» и проще. Сокращается видовое разнообразие
	6. Экотонизация биогеоценотического 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 микроэволюционные 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. Экотоновые 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 долголетних 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 западинного 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. Standford and J.J. Simons Eds. 1992. P. 3–13.

19. Шамсутдинов З.Ш. Создание долголетних 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 гидромелиорации. Глава 1.3.Азия // Охрана природы и освоение природных ресурсов. М. ВИНИТИ. 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 // Землеведение 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 гидрологичес-кой 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 ланшафно-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 рукооводством 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 вод[1]

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 подъемных 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 гидрологической 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 ($л/с*км^2$) 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. Белоусовой, К.Е. Питьевой, И.С. Зекцера, И.С. Пашковского, И.А. Позднякова, 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 инфильтрующийся 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 поды с поверхности земли, являются мощность, состав и сорбционная способность пород вадозной 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 вадозной 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 аккумулирования 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 Онего-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.: Гидрометеоиздат, 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., Клюквин А.Н. и др. Постоянно действующие модели гидролитосферы 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., Месхетели А.В. Подземный водообмен суши и моря. – Л.: Гидрометеоиздат, 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. Подземны 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. Калининым 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. Калининым создана научная школа 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 стока[1]

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 расходованием 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 создавшаяся 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.

Создавшаяся 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.*: Гидрометеоиздат, 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 лощины и суходолы.

В период паводков в суходолах формируются довольно значительные водные потоки, так как площадь водосборов суходолов обычно составляет 5–10 км^2 при сильной расчлененности рельефа и до 20–25 км^2 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]:

$$N_0 = E_N^{\varphi - 0} \text{ и } \overline{L}_0 = \overline{L}_1 E_L E^{0-1},$$

где N_θ – 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_θ – средняя длина притоков каждого порядка; $\overline{L}_1$ – 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 характеризуется площадью русловых и пойменных затоплений.

Следует иметь в виду, что дешифрированные 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

$$q = f(W). \qquad (1)$$

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 увлажненности. 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

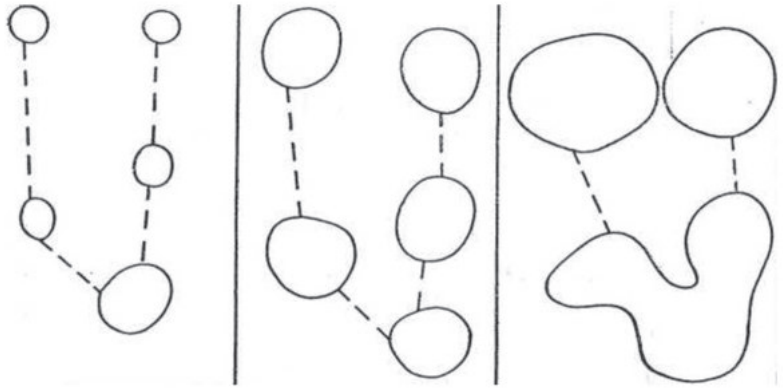


Рис. 1. Схема изменения покрытости бассейна водой при увеличении интенсивности стока

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

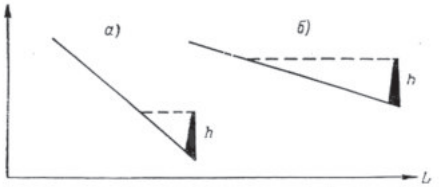


Рис. 2 Схема, иллюстрирующая изменение объемов воды на поверхности бассейна в зависимости от уклона при постоянной глубине: а – большой уклон; б – малый уклон

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 микроозер (при малом стоке) будет равен

$$W=H^2/2i \tag{4}$$

из (4) имеем

$$H=\sqrt{2iW}\,.$$

Если известна кривая распределения $f(H)$, то соответствующая ей кривая распределения объемов $\phi(W)$ выражается соотношением

$$\varphi(W)=\frac{t}{H}f(H). \tag{6}$$

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

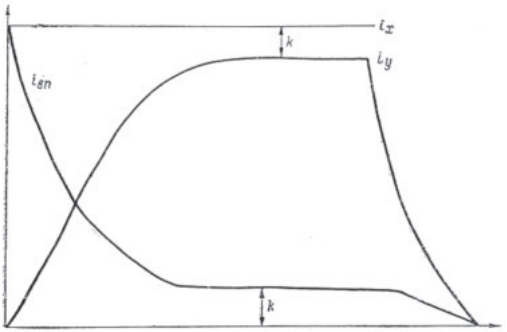


Рис. 3 Изменение во времени интенсивности осадков (ix), интенсивности стока (iy) и интенсивности впитывания (iy)

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

$$q = CS\overline{H}^{1+2/3} i^{0,5}, \tag{8}$$

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. Алексеева [2]

$$V_x = k + \frac{A}{\sqrt{t}}. \tag{9}$$

Параметр *k* устанавливался по интенсивности впитывания при длительном дождевании, когда уже происходила стабилизация расхода воды (рис 3).

Параметр $A_{t_{\max}}$ определялся из условия

$$\int_t^{t_{\max}} q dt = \int_0^{t_{\max}} (i_x - V_x) dt = \int_0^{t_{\max}} \left(i_x - \frac{A}{\sqrt{t}} - k \right) dt, \tag{10}$$

где $t_{\max}$ – время от начала дождя до конца паводка.

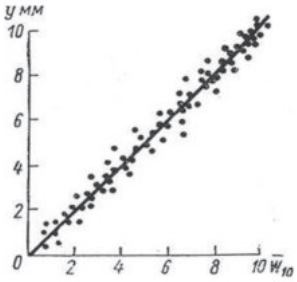


Рис. 4. Связь слоя стока с объемами воды, осредненными по 10-минутным интервалам времени

Величина текущих объемов воды W_t на поверхности склоновой площадки после установления параметров A и k определялась по соотношению

$$W_t = \int_0^t \left(i_x - y - \frac{A}{\sqrt{t}} - k \right) dt, \tag{11}$$

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

$$q = \int_0^{\tau_{max}} f(\tau)\varphi\,(W_{t-\tau})\,dt, \tag{12}$$

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

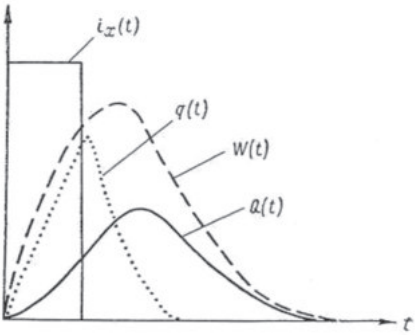


Рис. 5. Последовательность хода во времени интенсивности осадков (ix), притока воды q(t), объемов воды W(t) и расхода воды через замыкающий створ Q(t)

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

$$q = A\omega^n, \tag{13}$$

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

$$q = \alpha\omega + \beta\omega^2. \tag{14}$$

Используем очевидное условие, что

$$\sum q = \sum Q, \tag{15}$$

где Q – ежедневные расходы воды, тогда

$$A\sum\omega_i^n = \sum Q_i, \tag{16}$$

или

$$a\sum\omega_i + b\sum\omega_i^2 = \sum Q_i.$$

Задаваясь в первом случае наиболее вероятными значениями параметра п, 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

$$\sum Q = f(\sum\omega, \sum\omega^2), \tag{17}$$

по которой определяем параметры a и b.

Вторая задача расчетов (прогнозов) расходов сводится к расчету по генетической формуле стока

$$Q(t) = \int_0^{t=\tau_{max}} f(\tau) q_{1-\tau} d\tau. \tag{18}$$

$$Q = a \int_0^{t=\tau_{max}} f(\tau)\omega dt + b\int^t f(\tau)\omega^2 dt. \tag{19}$$

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

$$\eta=\frac{\omega}{\omega_{общ}}i_x,$$

где y – слой стока в единицу времени; i_x – интенсивность дождя; ω, $\omega_{общ}$ – соответственно площадь, покрытая водой, и общая площадь водосбора.

Определение и прогноз поверхностного стока по площади зеркала русловой 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 контролирующие 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

$$q=f(\bar{B}_1, \bar{B}_2, ..., \bar{B}_n), \tag{22}$$

где q – расход воды рассматриваемой категории притоков; $\bar{B}_1$, $\bar{B}_2$, …, $\bar{B}_n$ – соответственно средние ширины на некоторой длине выделенных притоков.

С другой стороны, как известно, расход в замыкающем створе может быть выражен формулой

$$Q(t)=\int_0^t q_{t-\tau}\, p(\tau)\, dt. \tag{23}$$

Здесь $q_{(t-\tau)}$ – суммарные расходы воды притоков рассматриваемой категории; $p(\tau)$ –кривая добегания воды от рассматриваемых притоков до замыкающего створа.

Таким образом, задача сводится к раскрытию функции $q(\bar{B}_1, \bar{B}_2, \ldots, \bar{B}_n)$, определению кривой добегания и последующему интегрированию полученных соотношений. Наиболее сложной задачей является определение $q(\bar{B}_1, \bar{B}_2, \ldots, \bar{B}_n)$.

Значительную помощь в раскрытии последней функции может оказать знание гидроморфометрической зависимости, изучению которой в гидрологии уделяется значительное внимание

Так, по Великанову:

$$\bar{B}=5{,}6\left(\frac{\bar{Q}}{\sqrt{qi}}\right)^{2/5}. \tag{24}$$

По С. И. Рыбкину, обработавшему большое количество материалов наблюдений, имеем

$$\bar{B}=6{,}75Q^{-0{,}57}k^{0{,}13}i^{-0{,}07}. \tag{25}$$

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:

$$q = A\bar{B}^n, \tag{26}$$

где показатель степени в первом приближении 2, что в случае необходимости должно уточняться. Тогда приток воды может быть определен по соотношению

$$q = A\sum\bar{B}^2, \tag{27}$$

или

$$q = A\sum\bar{B}^n. \tag{28}$$

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

$$Q(t)=\int_0^t \varphi(\sum l)_{t-\tau} p(\tau)d\tau. \qquad (31)$$

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,

$$\sum_0^t Q = W_0 + \sum q, \tag{32}$$

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

$$W_0 = f\left(\omega_3, \frac{\omega_2}{\omega_3}\right). \tag{33}$$

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

$$W_0 = f(W_{0\text{выч}}, \omega_1). \tag{34}$$

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

$$q = \mu \frac{dH}{dt} + \mu \frac{dH_1}{dt} . \qquad (35)$$

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 μ=0,1⇒0,15, а в суглинках μ=0,014⇒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

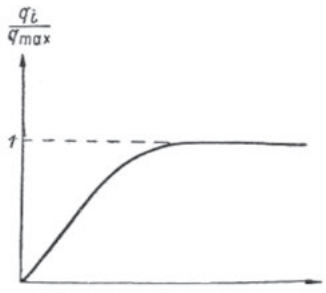


Рис. 6. Изменение во времени притока воды q в водоносные горизонты в долях от максимального притока <7тах при постоянном увлажнении бассейна

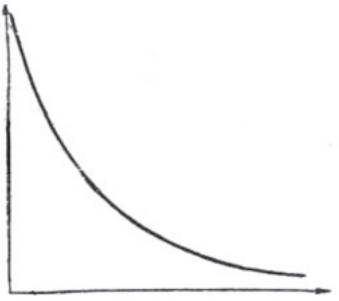


Рис. 7. Кривая спада подземного стока

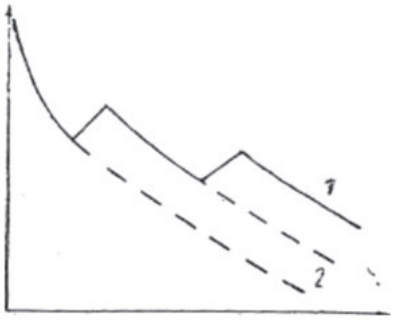


Рис. 8. Влияние притока воды в водоносные горизонты на трансформацию кривой спада подземного стока.
1 – трансформированная кривая спада, 2 – кривая спада без учета ее трансформации

$$\frac{dW}{dt} = \mu \frac{dH_1}{dt} = Q, \tag{36}$$

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 наинизшему возможному расходу воды, равен

$$W - W_{\min} = \int_{Q_{\min}}^{Q} Q(t)dt, \tag{37}$$

здесь $\int_{Q_{\min}}^{Q} Q(t)dt$ – площадь, ограниченная кривой спада (см. рис. 7) в интервале Q и $Q_{\min}$.

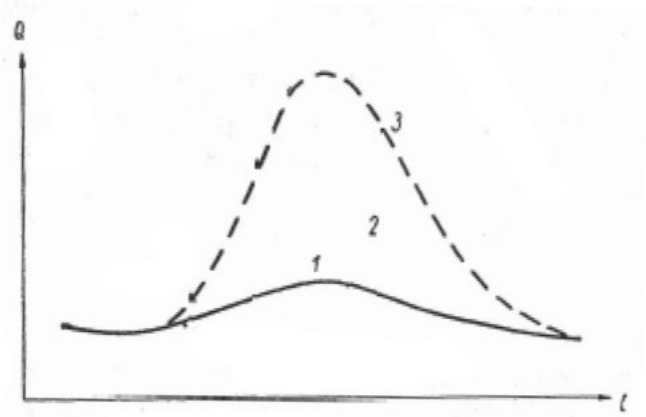


Рис. 9. Взаимосвязь поверхностных и подземных вод. 1 – подземный сток при условии отсутствия его взаимодействия с поверхностными водами; 2 – изменение подземного стока в результате его взаимодействия с поверхностным стоком; 3 – поверхностный сток

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 $Q_t=f(Q_{нач})$ может быть легко трансформирована в кривую $Q_t=f(W_t)$ или $Q_t=f(W–W_{min})$.

Необходимые для таких расчетов объемы воды будем получать по соотношению

$$W_{t+\Delta t}=W_t+(\bar{q}–\bar{Q}_t)\Delta t, \qquad (38)$$

здесь $W_{t+\Delta t}$, W_t – соответственно объемы воды в моменты времени t и $t+\Delta t$;, – 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 успевает 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

$$Q(t) = \int_0^{t=\tau_{max}} q_{t-\tau}\, p(\tau) d\tau. \qquad (39)$$

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

$$Q(t) = \int_0^{t=\tau_{max}} \bar{q}_{t-\tau}\, p_1(\tau) d\tau. \qquad (40)$$

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:

$$\bar{q}_{пр} = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{\Delta t} + \bar{Q}_t. \qquad (41)$$

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, гидравлико-морфометрических характеристик бассейнов, русел и пластов и т.д. Это удается 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 чрезвычайное 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 растительности[2]. 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 «Джемини-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 (Э) и затратами (З) на проведение измерений и составление прогнозов будет максимальной $\psi(\Delta)$=макс. Для этой цели необходимо построить зависимость между возможной экономией (Э) и погрешностью прогноза Δ, а также степенью общих затрат, связанных с построением прогноза и его погрешностью.

Решая равенство $Э(\Delta)-З(\Delta)=\psi(\Delta)$, определяем $\psi(\Delta)$=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. Теннесси, где имеется густая сеть гидрометеорологических станций.

- Проведение работ для какого-либо другого бассейна с густой сетью гидрометеорологических станций и заметно отличающегося от долины р. Теннесси физико-географическими и климатическими условиями.
- Испытание разработанной модели при отсутствии наблюдении 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 Теннесси 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

Изучаемые 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 методами[3]

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,

$$Q_t = \int_0^{t=\tau_{max}} \eta F_{t-\tau} i_{t-\tau} p(\tau) d\tau, \qquad (42)$$

где i – интенсивность водоотдачи снежного покрова; F – площадь бассейна, покрытая снегом; $p(\tau)$ – кривая добегания; 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:

$$p=F_{с}/F_{общ}$$

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:

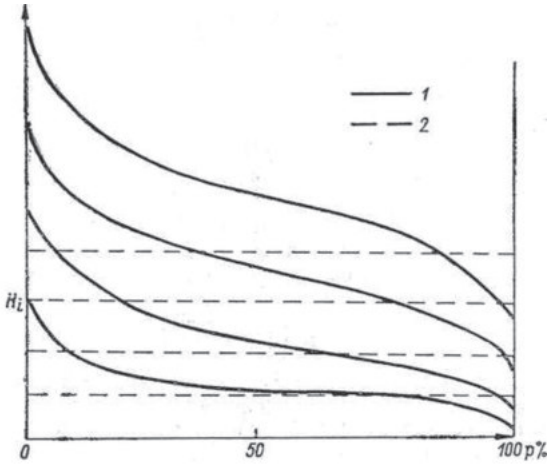


Рис. 10. Интегральные кривые распределения снегозапасов (Н) по площади бассейна, выраженной в % (р%) 1 – интегральные кривые снегозапасов; 2 – слой стаявшего снега

$$\overline{H} = \varphi\left(H_i, \frac{F_{сн}}{F_{общ}}\%\right). \qquad (43)$$

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 опенки 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 y приближенно выражается уравнениями:

$$y = x - p_0\left(1 - e^{-\frac{x}{p_0}}\right), \tag{44}$$

или

$$y = x - p_0 \operatorname{th}\frac{x}{p_0}. \tag{45}$$

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, термику водоемов и динамику площадей русловой сети;
- стоковые 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 аэрофотосъемок 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., Гидрометеоиздат, 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 землеведения. Л., Гидрометеоиздат, 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., Гидрометеоиздат, 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., Гидрометеоиздат, 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., Гидрометеоиздат, 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., Гидрометеоиздат, 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., Гидрометеоиздат, 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., Гидрометеоиздат, 1973, 427 с.

35. Ade1man 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-l). 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 sourveillance 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 Symposiam on the role of snow and ice in Hydrology. Symposium on measurements and forcasting. 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 проведённых 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 лет[1]

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 $R\tau=1=0{,}25$, где $R\tau=1$ – 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)

ляет 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 τ=1 год			Сдвиг τ=2 года			Сдвиг τ=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 Rτ=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

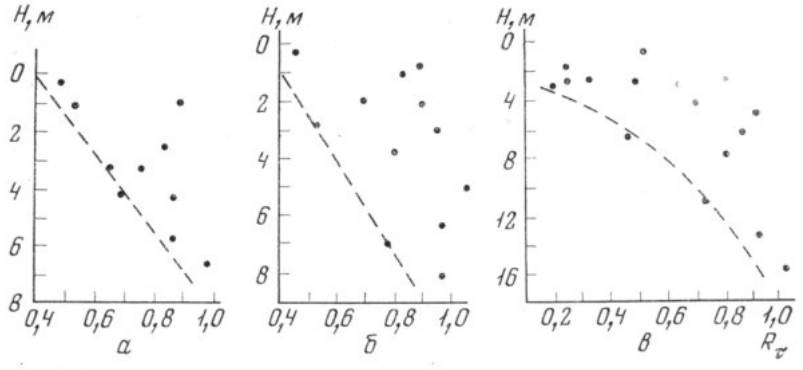


Рис. 1. Графики зависимости коэффициентов автокорреляции от глубины залегания грунтовых вод в супесях (а), суглинках (б) и песках (в)

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.*, Гидрометеоиздат, 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 окончания 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 деятельностью 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 приращениях 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 стока[1]

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 длиною 186 км, рассчитанный на подачу до 0,9 м^3/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-распределе-

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 Cs 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, имеющихся 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 закрепленном 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 обусловливающих 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 и 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, распространимые 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 половодий 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, предназначаемых 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 корреляционной 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. Айвазьяна (1941) и многих других исследователей.

Разработка и усовершенствование 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 (Андреянов, 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 ущербы, 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; Бахтиаров, 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 м^3 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. Водохранилище, 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 ущербы, 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 запаса 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 водоподачи, 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 – преуменьшением 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 водообеспечении. 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 удается 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 предопределяют 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 расчет 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 наблюденному 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, наблюденных 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 величине 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 сток 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 сток 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 па 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; Гуглий, 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 корреляционных 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 корреляционные связи между стоком различных частей водохозяйственной системы и промежутков времени; производятся случайные выборки, по которым строятся искусственные стоковые ряды большой длительности, например 10 000 лет; при этом принимаются во внимание корреляционные 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. Саддлера (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, оцениваe-

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 половодных 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 прослеживать

продвижение воды по руслам рек и учитывать важнейшие факторы, влияющие на режим регулирования. Основой таких расчетов служат наблюденные 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 наблюденному 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 водоподачи, уровенный 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 концентров.

Первый концентр – оптимизация режима работы водохозяйственной системы при заданных ее параметрах и заданном водопотреблении. Цель исследований этого концентра – 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 непременным 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. Андреянов В.Г. Методика расчетов сезонного регулирования стока на основе кривой обеспеченности расходов. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 9(63), 1948.

4. Андреянов В.Г. Обобщенный метод расчета сезонного регулирования стока. – Труды Гос. гидрологического ин-та, вып. 43(97), 1954.

5. Андреянов 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. Бахтиаров 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. Гуглий 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.*, Гидрометеоиздат, 1968.

28. Картвелишвили Н.А. Статистический метод в теории регулирования речного стока. Труды III Всес. гидрологического съезда, Т. VI. *Л.*, Гидрометеоиздат, 1959.

29. Картвелишвили Н.А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. *Л.*, Гидрометеоиздат, 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. Ущербы 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 инта, 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 водохранилищами. 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., T. 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 Крицкий[2] 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 в1926 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 отсчет 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 (басеінів 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 (Meyer), 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 распластывании 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. Мультановского), 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-

МАТЕМАТИКА—ГИДРОЛОГАМ

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА, орошение земель, водоснабжение, водный транспорт — далеко не полный перечень областей человеческой деятельности, основанных на инженерной гидрологии — науке, занимающейся изучением водных ресурсов суши. Среди других технических наук инженерная гидрология имеет ту особенность, что в ней и в ее приложениях определяющую роль играет случай. Случайность не означает хаоса или бесструктурности; случай имеет свои законы, значительно более сложные и общие, чем законы неслучайного.

Люди используют водные ресурсы и строят гидротехнические сооружения с незапамятных времен. В связи с этим издавна приходилось давать каждое количественные оценки водных ресурсов рек. Однако лишь с конца прошлого столетия эти оценки стали делаться на научной основе изучения случайных событий — теории вероятностей и математической статистики. У истоков этого направления стоял классик геофизики, климатологии и гидрологии А. И. Воейков. Особенно развитие оно получило в последнее довоенное и первое послевоенное десятилетия в работах Л. Л. Сикановского, С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля и в работах других, главным образом советских исследователей. Объектом приложения инженерной гидрологии тогда были одиночные гидроузлы.

По режиму реки лишь весьма схематично можно представить в виде набора случайных событий, в действительности же это гораздо более сложное явление — случайный или так называемый стохастический (от греческого «стохастикос» — умеющий угадывать) процесс. Понятие стохастического процесса — сравнительно молодое физическое и математическое понятие. В инженерную гидрологию его ввели авторы цикла монографий «Создание нового, стохастического направления в гидрологии и теории регулирования речного стока каскадами водохранилищ в статьях середины пятидесятых годов. К настоящему времени стохастическое направление в гидрологии и ее приложениях получило существенное развитие в ряде советских и зарубежных работ, обобщенных в монографиях указанного цикла, включая сложные вопросы стохастических связей режима реки и ее притоков, а также режимов различных рек и преобразования их стока системами водохранилищ, в частности каскадами. Стохастическая гидрология, дающая полное математическое описание природных гидрологических процессов, адекватное их физической сущности, — это необходимая основа экономической оптимизации схем и параметров водохозяйственных систем и назначения их режимов, равно как и средство повышения надежности этих систем, то есть сведения к минимуму вероятности дефицитов в обеспечении водой потребителей.

Монографии рассматриваемого цикла дают инструмент для решения этих вопросов и свидетельствуют об успешном его использовании в инженерной практике СССР и других стран.

Создание стохастического направления в гидрологии и водном хозяйстве — значительное исследование, достойное Ленинской премии.

А. КОЛМОГОРОВ,
академик.

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 единовременном 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 регулирования 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, Гидрометеоиздат, 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. Ущербы 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., Гидрометеоиздат, 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 корреляционной 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.Л., 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. Уровенный режим Аральского моря при развитии водопотребления в бассейнах рек Сыр-Дарьи и Аму-Дарьи. Труды Гидропроекта, сб. 12, 1964. 211–221 с.

43. Раткович Д.Я. О развитии вероятностной методики прогнозирования уровня бессточных водоемов и прогнозах уровня Каспийского моря. Водные ресурсы №2, 1988. 30–40 с.

О некоторых приемах статистического анализа гидрологических рядов[1]

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 преемственно 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 ГГИ, 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 обусловливаются 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 корреляционный 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.

$$S=\sum_{i=1}^{i=n}\left[y_i-(ax_i+b)\right]^2. \qquad (1)$$

Как известно, решение отыскивается приравниванием нулю производной этой суммы по параметрам a и b. Вывод элементарен. Все же ввиду его принципиального значения для рассматриваемой задачи напомним необходимые преобразования. Приравнивание нулю производных суммы (1) квадратов отклонений по параметрам приводит к следующим уравнениям:

производная по a $$\frac{\partial S}{\partial a}=2\sum^{n}(y_i-ax_i-b)(-x_i)=0,$$

отсюда $$-\sum^{n}x_iy_i+a\sum^{n}x_i^2+b\sum^{n}x_i=0, \qquad (2)$$

производная по b $$\frac{\partial S}{\partial b}=2\sum^{n}(y_i-ax_i-b)=0,$$,

отсюда $$\sum^{n}y_i-a\sum^{n}x_i-nb=0. \qquad (3)$$

Обозначим средние значения переменных:

$$\frac{\sum^{n}x_i}{n}=\overline{x};\ \frac{\sum^{n}y_i}{n}=\overline{y}.$$

Решая уравнения (1) и (2) относительно параметров *a* и *b*, получаем:

$$a = \frac{\sum_{n}^{n} x_i y_i - b\overline{xy}}{\sum_{n}^{n} x^2 - n\overline{x}^2};\ b = \overline{y} - a\overline{x}.$$

Коэффициент пропорциональности *a* приводится к виду $a=r(\sigma_y/\sigma_x)$, где

$$r = \frac{\sum_{n}^{n}(x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{n}^{n}(x_i - \overline{x})^2 \sum_{n}^{n}(y_i - \overline{y})^2}}$$

– выборочное значение коэффициента корреляции между переменными,

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{n}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n}}\ ;\ \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{n}^{n}(y_i - \overline{y})}{n}}$$

– средние квадратические отклонения переменных от их арифметических средних.

Свободный член

$$b = \overline{y} - a\overline{x} = \overline{y} - r\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\overline{x}.$$

Подстановка этих величин приводит зависимость между переменными к виду $y=ax+b=ax+\bar{y}-a\bar{x}$;

отсюда

$$y - \overline{y} = a(x - \overline{x}) = r\frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x - \overline{x}).$$

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:

$$x - \overline{x} = r\frac{\sigma_x}{\sigma_y}(y - \overline{y}).$$

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 наблюденных сочетаний переменных и не ограничивается какими-либо условиями относительно распределения их вероятностей. Иными словами, по отношению к наблюденным точкам

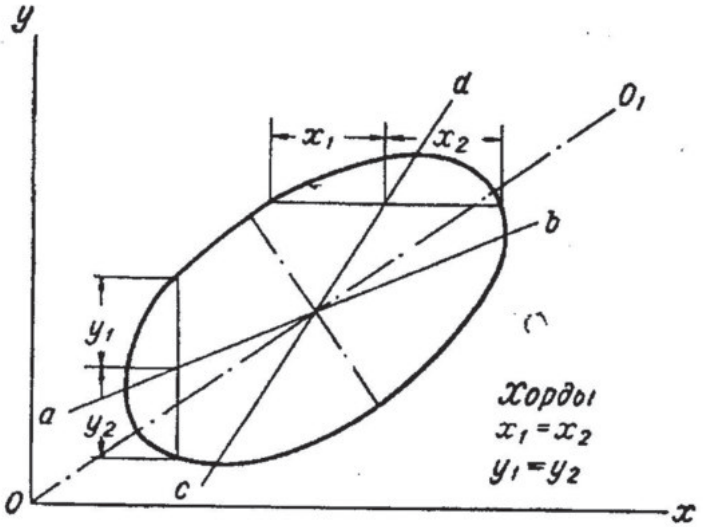


Рис. 1. Эллипс рассеивания и линии регрессии

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_{y_N}.

Для этого составляются регрессии:

$$\overline{y}_N = \overline{y}_n + r\,\frac{\sigma_{yN}}{\sigma_{xN}}\,(\overline{x}_N - \overline{x}_n), \tag{4}$$

$$\sigma^2_{yN} = \sigma^2_{yn} + r^2\,\frac{\sigma^2_{yN}}{\sigma^2_{xN}}\,(\sigma^2_{xN} - \sigma^2_{xn}), \tag{5}$$

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 $\sigma^2_{y_N}$ определяется решением квадратного уравнения (5)

$$\sigma^2_{yN} = \frac{\sigma^2_{yn}}{1 - r^2\left(1 - \frac{\sigma^2_{xn}}{\sigma^2_{x_N}}\right)}. \qquad (6)$$

По параметрам y_N и σ_{y_N} строится кривая обеспеченности $y(p)\backslash$; по ней определяется значение y_p.

Для приближенной оценки точности полученных многолетних параметров служат формулы стандартных ошибок:

$$\varepsilon_{\bar{y}} = \pm \frac{\sigma_{yn}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{N-n}{N} r^2}, \qquad (7)$$

$$\varepsilon_{\sigma\bar{y}} = \pm \frac{\sigma_{yn}}{\sqrt{2n}} \sqrt{1 - \frac{N-n}{N} r^4}. \qquad (8)$$

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 корреляционной 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:

$$y-\overline{y}=\frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x-\overline{x}). \qquad (9)$$

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 равнообеопеченными 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 корреляционной зависимости, связывающей измеренные величины, перейти к функциональной зависимости, свойственной действительным физическим величинам. Именно изменением природы исследуемых величин объясняется в этом случае превращение корреляционной 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 корреляционной. Установим ее характеристики и вид уравнений регрессии и «единого решения». Пусть $\bar{z}$ – математическое ожидание величины z, σ_z – ее стандарт.

Тогда математические ожидания $\bar{X}=\bar{y}=\bar{z}$; 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

$$\frac{1}{n}\sum^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})=\frac{1}{n}\sum^{n}(z_i-\bar{z}+u_i-\bar{u})(z_i-\bar{z}+v_i-\bar{v})=\frac{1}{n}\sum^{n}(z_i-\bar{z})^2.$$

Математическое ожидание ковариации равно

$$\mathrm{Cov}(xy)=\sigma_z^2$$

Коэффициент корреляции между x и y

$$r=\frac{\mathrm{Cov}(xy)}{\sigma_x\,\sigma_y}=\frac{\sigma_z^2}{\sqrt{(\sigma_z^2+\sigma_u^2)(\sigma_z^2+\sigma_v^2)}}=\frac{1}{\sqrt{\left(1+\dfrac{\sigma_u^2}{\sigma_z^2}\right)\left(1+\dfrac{\sigma_v^2}{\sigma_z^2}\right)}}.$$

Единое решение:

$$y-\bar{y}=\frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x-\bar{x})\sqrt{\frac{1+\dfrac{\sigma_u^2}{\sigma_z^2}}{1+\dfrac{\sigma_v^2}{\sigma_z^2}}}\,(x-\bar{x}).$$

Регрессия y по x

$$y-\bar{y}=r\frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x-\bar{x})=\frac{1}{1+\dfrac{\sigma_u^2}{\sigma_z^2}}(x-\bar{x}).$$

Регрессия x по y

$$x-\bar{x}=r\frac{\sigma_x}{\sigma_y}(y-\bar{y})=\frac{1}{1+\dfrac{\sigma_v^2}{\sigma_z^2}}(y-\bar{y}).$$

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_b, 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» **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 приходит 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.

Корреляционные 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 корреляционно 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, связи между смежными величинами, как правило, тесны. 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 $x_1 \ldots x_i \ldots x_{n+i}$ 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:

$-x_1 \ldots x_i \ldots x_n, x_{n+1};$

$x_1, x_2 \ldots x_{i+1} \ldots x_{n+1}, -$

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:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}(x_i - \overline{x}_1)(x_{i+1} - \overline{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n}(x_i - \overline{x}_1)^2 \sum_{i=2}^{i=n+1}(x_i - \overline{x}_2)^2}}. \qquad (1)$$

Здесь

$$\overline{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n}; \quad \overline{x}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_{i+1}}{n}.$$

.

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 уравновешиваются, 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 знаменатель общераспространенной формулы величины $\sigma=\sqrt{\frac{\sum^{i=n}(x_i-\overline{x})^2}{n-1}}$ 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:

$$\sum_{i=1}^{i=n}(x_i-\overline{x}_1)(x_{i+1}-\overline{x}_2)=\sum_{i=1}^{i=n}x_i x_{i+1}-n\overline{x}_1\overline{x}_2.$$

Заметим, что:

$$n\bar{x}_1\bar{x}_2=n\bar{x}_1[\bar{x}_1+(\bar{x}_2-\bar{x}_2)]=n\bar{x}^2_1-\bar{x}_1\Delta x.$$

Здесь $\Delta x=x_1-x_{n+1}$ – разность между первым и последним членами выборочного отрезка ряда.

Отсюда:

$$\sum_{i=1}^{i=n}(x_i-\bar{x}_1)(x_{i+1}-\bar{x}_2)=\sum_{i=1}^{i=n}x_ix_{i+1}-n\bar{x}_1^2+x_1\Delta x.$$

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:

$$M\sum_{i=1}^{i=n}(x_i-\bar{x}_i)(x_{i+1}-\bar{x}_2)=\sigma^2(n\rho-1)-$$

$$-\frac{2\sigma^2}{n}\cdot\frac{\rho}{1-\rho}\left(n-\frac{1-\rho^n}{1-\rho}\right)+\frac{\sigma^2(1-\rho)^n}{n}. \qquad (3)$$

Последнее слагаемое правой части равенства (3) выражает математическое ожидание произведения $\Delta x\times x_1$ 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 наблюденных 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

$$M\sum_{i=1}^{i=n}(x_i-\bar{x})^2=\sigma^2\left[n-1-\frac{2}{n}\cdot\frac{\rho}{1-\rho}\left(n-\frac{1-\rho^n}{1-\rho}\right)\right]. \qquad (4)$$

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

$$r = \frac{n\rho - 1 - \frac{2}{n} \cdot \frac{\rho}{1-\rho}\left(n - \frac{1-\rho^n}{1-\rho}\right)}{n - 1 - \frac{2}{n} \cdot \frac{\rho}{1-\rho}\left(n - \frac{1-\rho^n}{1-\rho}\right)}. \qquad (5)$$

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,

$$r = -\frac{1}{n-1}. \qquad (6)$$

Это означает, что оценка по формуле (I) 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 $\rho \to 1$ 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 $\rho \to 1$ 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 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:

$$r_{uv} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}(u_i - \overline{u})(v_1 - \overline{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n}(u_i - \overline{u})^2 \sum_{i=1}^{i=n}(v_i - \overline{v})^2}}$$

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 ϱ=0 и ϱ=1 смещение отсутствует.

Путем дифференцирования и приравнивания производной нулю можно установить, что максимум смещения находится при ϱ=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 $x_1x_2...x_ix_{i+1}...x_nx_{n+1}$, 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

$$\left(x_2 - \frac{x_1+x_2+\ldots+x_i+\ldots+x_n}{n}\right) \times \left(x_3 - \frac{x_2+\ldots+x_i+\ldots+x_n+x_{n+1}}{n}\right),$$

произведения членов с одинаковыми индексами образуют квадраты x_i^2, которых нет в соответствующих выражениях для самостоятельных рядов. Значения произведений вида x_ix_{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 ($\varrho=0$):

$$M\sum^{n}(x_i-\overline{x})(x_{i+1}-\overline{x})=-\tau^2$$ [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 $\varrho=0$ 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: ρ_{xx}, $\rho_{x\Delta}$, $\rho_{\Delta\Delta}$. Соотношения между коэффициентами корреляции выражаются следующими равенствами:

$$\rho_{xx}=1-(-2\rho_{\Delta\Delta});\ \rho_{\Delta\Delta}=-\frac{1-\rho_{xx}}{2}, \tag{7}$$

$$\rho_{x\Delta}=-\sqrt{\frac{1-\rho_{xx}}{2}};\ \rho_{xx}=1-2\rho_{x\Delta}^2, \tag{8}$$

$$\rho_{\Delta\Delta}=-\rho_{x\Delta}^2;\ \rho_{x\Delta}=-\sqrt{-\rho_{\Delta\Delta}}\ . \tag{9}$$

Предельные соотношения таковы:

ρxx	$\rho\Delta\Delta$	$\rho x\Delta$
–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 ($\rho_\Delta=0$) коэффициент корреляции между смежными членами последовательности, согласно уравнению (8), равен $r_{xx}=+1$, а дисперсия членов последовательности ρ_x^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 величии 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] $\rho_{xx}=\frac{1-0{,}5Al_*}{1+0{,}5Al_*}=0{,}96$, 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_*=0,8м/год – средний многолетний слой видимого испарения с зеркала моря (испарение минус осадки).

Высокий коэффициент корреляции ρ_{xx}=0,96 свидетельствует о большой инерции уровенного 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 ρ_{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

$$\rho_{\Delta l_* \Delta l+k} = -\rho_{xx}^{k-1}\,\frac{1-\rho_{xx}}{2}. \qquad (10)$$

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 ρ_{xx}=0 все связи, более отдаленные, чем между смежными разностями, – нулевые.

Уточнение формул стандартных ошибок оценки параметров гамма-распределения

Гамма-распределение (иначе – биноминальная 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 εc_v оценки этого параметра по выборке из *n* членов таково:

$$\varepsilon_{Cv} = \frac{C_v}{\sqrt{2n}} \sqrt{1+C_v^2} \qquad (1)$$

(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:

$$\varepsilon^2_{\bar{x}} = \frac{\mu_2}{n} = \frac{\sigma^2}{n}. \qquad (2)$$

Дисперсия выборочных оценок второго центрального момента находится для гамма-распределения из следующих преобразований [9]:

$$\varepsilon^2_{m_2} = \frac{1}{n}(\mu_4 - \mu_2^2) = \frac{1}{n}\left(3\mu_2^2 + \frac{6\mu_2^3}{x_0^2} - \mu_2^2\right) = \frac{2}{n}\sigma^4(1+3C_v^2). \qquad (3)$$

Ковариация оценок среднего и второго центрального момента равна:

$$\varepsilon_{\bar{x}}\,\varepsilon_{m_2}\rho_{\bar{x}m_2} = \frac{\mu_3}{n},$$

здесь $\rho_{\bar{x}m2}$ – коэффициент корреляции между выборочными оценками среднего 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. $C_S = \dfrac{\mu_3}{\mu_2^{1,5}} = \dfrac{2\mu_2^{0,15}}{x_0}$. Отсюда:

$$\mu_3 = \frac{2\mu_2^2}{x_0}.$$

Из этих соотношений следует, что:

$$\varepsilon_{\bar{x}}\varepsilon_{\bar{x}m_2} = \frac{2}{n}C_v\sigma^3. \qquad (4)$$

Дисперсия выборочных оценок коэффициента вариации связана с дисперсиями определяющих его параметров приближенным равенством:

$$\varepsilon^2_{Cv} = \varepsilon^2_{\bar{x}}\left(\frac{\partial C_v}{\partial x_0}\right)^2 + \varepsilon^2_{m_2}\left(\frac{\partial C_v}{\partial \mu_2}\right)^2 + 2\rho_{\bar{x}}\mu_2\varepsilon_{\bar{x}}\frac{\partial C_v}{\partial x_0}\varepsilon_{m_2}\frac{\partial C_v}{\partial \mu_2}. \qquad (5)$$

Производные C_v по параметрам равны:

$$\frac{\partial C_v}{\partial x_0} = -\frac{\sigma}{x_0^3};\ \frac{\partial C_v}{\partial \mu_2} = \frac{1}{2\sigma x_0}. \qquad (6)$$

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 ($\varepsilon c_v/C_v$) 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:

$$\varepsilon_{x\rho} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{1+2\left(\frac{\Phi}{2}+\Phi' C_v\right)^2(1+2C_v^2)+4C_v\left(\frac{\Phi}{2}+\Phi' C_v\right)-4\Phi' C_v^2(1+\Phi' C_v+\Phi' C_v^2)}. \qquad (7)$$

Здесь $\Phi = \frac{x_\rho - x_0}{\sigma}$ – нормированное отклонение от среднего, определяемое по таблице Фостера–Рыбкина, $\Phi' = \frac{d\Phi}{dC_S}$ – производная Ф 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:

$$x_\rho = x_0 k_\rho \tag{8}$$

где k_ρ – 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:

$$\varepsilon^2_{x\rho} = \varepsilon^2_{\bar{x}}\left(\frac{\partial x_\rho}{\partial \bar{x}}\right) + \varepsilon^2_{C_v}\left(\frac{\partial x_\rho}{\partial C_v}\right) + 2\rho_{\bar{x}C_v}\frac{\partial x_\rho}{dx_0}\frac{\partial x_\rho}{\partial C_v}. \tag{9}$$

Для гамма-распределения оценки среднего $\bar{x}$ и коэффициента вариации C_v корреляционно не связаны [13].

На этом основании принимаем $\rho x^{C_v} = 0$, тогда выражение (9) может быть записано в виде:

$$\varepsilon^2_{x\rho} = \varepsilon^2_{\bar{x}}\left(\frac{\partial x_\rho}{\partial \bar{x}}\right)^2 + \varepsilon^2_{C_v}\left(\frac{\partial x_\rho}{\partial C_v}\right)^2, \tag{10}$$

в этом выражении:

$$\varepsilon^2_{\bar{x}} = \frac{\sigma^2}{n};\ \varepsilon^2_{C_v} = \frac{C_v^2(1+C_v^2)}{2n},$$

$$\frac{\partial x_\rho}{\partial x_0} = k_\rho;\ \frac{\partial x_\rho}{\partial C_v} = x_0\frac{\partial k_\rho}{\partial C_v}.$$

Производная $\frac{\partial k_\rho}{\partial C_v}$ может быть вычислена приближенно по таблице ординат кривых гамма-распределения так же, как в формуле (7).

В результате получаем следующее выражение:

$$\varepsilon_{x\rho}=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\sqrt{k_\rho^2+\frac{1+C_v^2}{2}\left(\frac{\partial k_\rho}{\partial C_v}\right)^2}\ . \qquad (11)$$

Переходя к относительной стандартной ошибке $\frac{\varepsilon x_\rho}{x}$, получаем окончательно такое выражение:

$$\frac{\varepsilon x_\rho}{x_\rho}=\frac{C_v}{\sqrt{n}}\sqrt{1+\frac{1+C_v^2}{2k_\rho^2}\left(\frac{\partial k_\rho}{\partial C_v}\right)^2}\ . \qquad (12)$$

Для компактности выражение (12) может быть записано также в виде

$$\frac{\varepsilon x_\rho}{x_\rho}=\frac{C_v}{\sqrt{n}}\sqrt{1+\frac{1+C_v^2}{2}\left(\frac{\partial}{\partial C_v}\ln k_\rho\right)^2}\ . \qquad (13)$$

Формула (11) представляет собой другое по форме выражение зависимости (7).

Для сопоставления значений стандартных ошибок εx_ρ, 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 399%8, 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 корреляционной 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:

$$\mathrm{Cov}(\bar{x},s)=\varepsilon_{\bar{x}}\varepsilon_s\rho_{\bar{x}s}=\frac{1}{2\sigma}\cdot\frac{2\sigma^4}{n\bar{x}}=\frac{\sigma^2}{n}C_v.$$

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:

$$\rho_{\bar{x}s}=C_v\sqrt{\frac{2}{1+3C_v^2}}. \qquad (14)$$

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 $C_v\to\infty$ коэффициент корреляции $\rho_{\bar{x}s}\to\sqrt{\frac{2}{3}}=0{,}82$. Коэффициенты вариации годовых колебаний речного стока в засушливых местностях, как известно, близки к единице. При этом коэффициент корреляции $\rho_{xs}\to\sqrt{\frac{1}{2}}=0{,}71$, 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. Крицкий 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. Уровенный 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 н гидрологические расчеты. Гидрометеоиздат, 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 стока[1]

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 региональный 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 км^2.

[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*/км^2·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 меженным летним 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·км^2 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 вли-

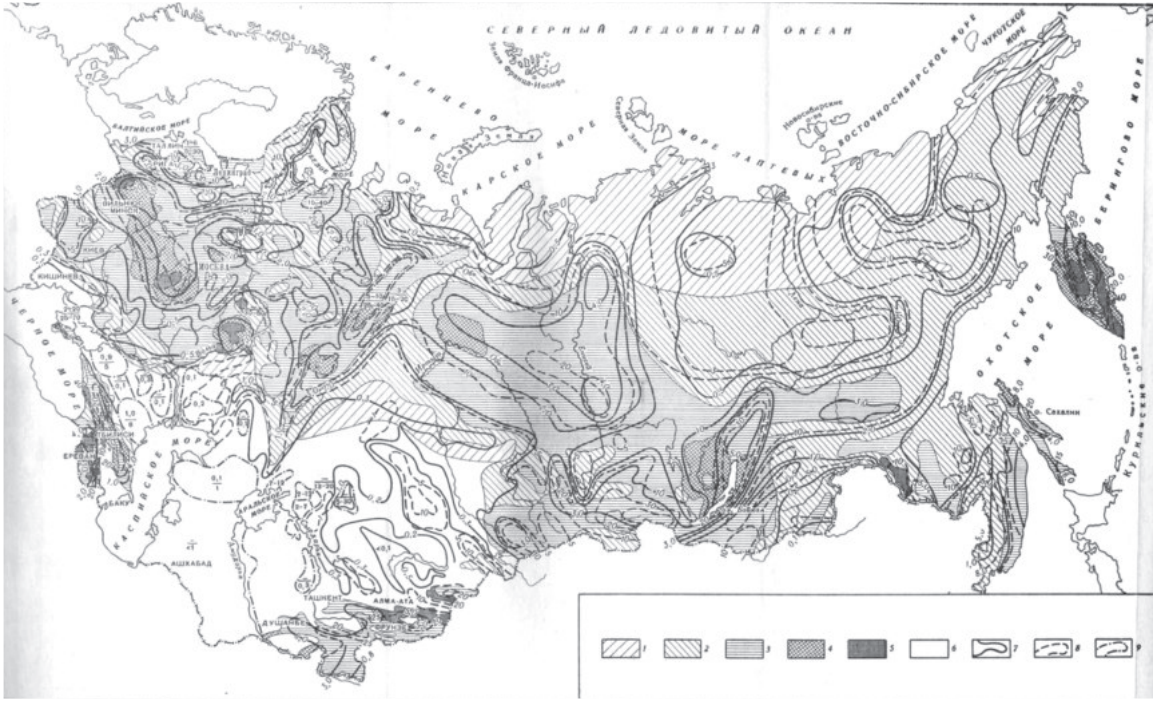
янием тех же причин уменьшаются модули от 3,0–2,5 в районах Обской губы и Енисейского залива до 0,5–0,3 в Северном Казахстане, Барабинской и Кулундинской степях.

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 среднемноголетних модулей подземного стока, л/сек; 8 – изолинии среднемноголетних коэффициентов подземного стока, % от осадков; 9 – участки сложных условий формирования подземного стока, в которых указаны пределы колебаний или средние значения: числитель – модули подземного стока, знаменатель – коэффициенты подземного стока

ском плато (побережье Финского залива) и в других местах. Однако это явление носит узколокальный 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 км^3.

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 км^2. Они составили величину, превышающую 30 000 м^3/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.

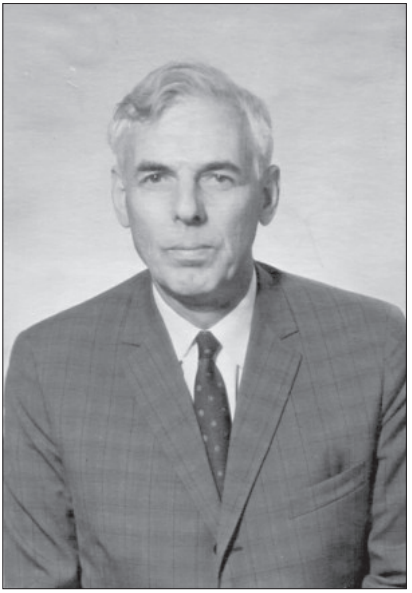
Задачи дальнейших исследований. В области изучения подземного стока и связанных с ним проблем на первый план выступают очередные наиболее актуальные задачи:

- 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 тепломассопереноса 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. Калининым, 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 Объёдиненных 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 среды[1]

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 – уникум, 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 прослеживать 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 – макрорастительность 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., Scalf 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. Ласкорина[4].

[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 договора, 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.

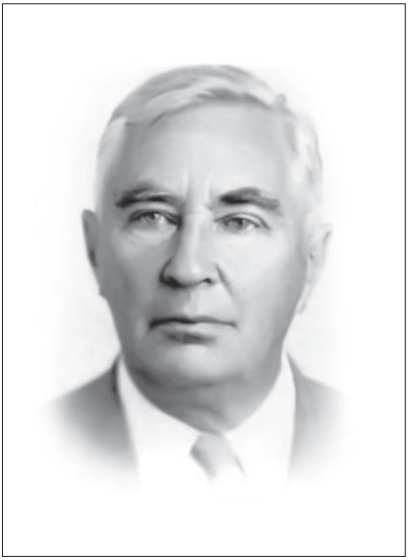
ЛИТЕРАТУРА

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. T. 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 проектирования 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 1966г. 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., Гидрометеоиздат, 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 уровенного 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 климата[1]

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

$$
\begin{aligned}
c\frac{dT}{dt} &= \frac{S_0}{4}\left(1-\alpha\left(W_1, W_2, \ldots, W_N, T,\right)\right) - I(T,C) \\
\frac{dW_i}{dt} &= P_i(T) - E_i(W_i, T) - q_i(W_i) - Q_i. \\
t_i\frac{dQ_i}{dt} &= G_i(W_i) - Q_i \\
t_C\frac{dC}{dt} &+ (C - C_S) = n(T - T_S),\ i = 1, 2, \ldots, N,
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

[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 альбедо 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=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:

$$\theta=\frac{T-T_s}{T_s},\ X_i=\frac{W_i-W_i^S}{W_i^S},\ Y_i=\frac{Q_i-Q_i^S}{Q_i^S},\ \bar{C}=\frac{C-C_s}{C_s},\ \tau=\frac{t}{\bar{t}},\ \Lambda=\frac{t_C}{\bar{t}},$$

$$m=c^{-1}\left(\frac{S_0}{4}\frac{\partial\alpha}{\partial T}+\frac{dI}{dT}\right)\bar{t},\ \bar{n}=\frac{nT_S}{C_S},\ \zeta=\frac{I_C' C_S \bar{t}}{cT_S}.$$

Тогда система (1) может быть сведена к набору взаимосвязанных нелинейных осцилляторов относительно влагозапаса суши и линейных уравнений относительно температуры и концентрации диоксида углерода:

$$\ddot{X}_i+\left[1-a_i\bar{t}+3b_i(W_i^s)^2\bar{t}X_i^2\right]\dot{X}_i+(d_i-a_i)\bar{t}X_i+(b_i+e_i)(W_i^s)^2\bar{t}X_i^3=\frac{p_i\bar{t}T_S}{W_i^s}(\dot{\theta}+\theta)$$

$$\dot{\theta}+m\theta=\frac{\bar{t}}{cT_s}\left(\sum_{i=1}^{N}\alpha_i W_i^s X_i\right)+\zeta\bar{C}, \qquad (2)$$

$$\Lambda\dot{\bar{C}}+\bar{C}=N\theta.$$

О странном аттракторе модели

Рассмотрим простейший вариант (1) и докажем существание 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:

$$\ddot{U}_1+\mu_1\dot{U}_1-\frac{\omega_1^2}{2}U_1(1-U_1^2)=\frac{p_1\bar{t}T_S}{W_1^S A_1}(\dot{\theta}+\theta),$$

$$\ddot{U}_2-\mu_2(1-U_2^2)\dot{U}_2+\omega_2^2U_2+\frac{\mu_2}{3}U_2^3=\frac{p_2\bar{t}T_s}{W_2^s A_2}(\dot{\theta}+\theta), \qquad (3)$$

$$\dot{\theta}+m\theta=\frac{\bar{t}}{cT_s}\left(\sum_{i=1}^{2}\alpha_i W_i^S A_i U_i\right),$$

$$\Lambda\dot{\bar{C}}+\bar{C}=N\theta,$$

где $\mu_1=1-a_1\bar{t}$, $\mu_2=a_2\bar{t}-1$, $\omega^2_1=2(a_1-d_1)\bar{t}$, $\omega^2_2=(d_2-a_2)\bar{t}$,

$$U_1=\frac{X_1}{A_1}, U_2=\frac{X_2}{A_2}, A_1=\sqrt{\frac{a_1-d_1}{e_1(W_1^s)^2}}, A_2=\sqrt{\frac{\mu_2}{3\bar{t}b_2(W_2^s)^2}}.$$

Коэффициенты μ_1, μ_2 характеризуют «трение» в осцилляторах, A_1, A_2 – амплитуды, а ω_1, ω_2 – частоты колебаний. При $m=1, p_2=0$ система (3) может быть сведена к уравнению Дуффинга с периодической внешней силой.

Действительно, при $\mu_2\to 0$ второе уравнение имеет гармоническое решение $U_2=2\cos\omega_2\tau$ и система (3) принимает простейший вид:

$$\ddot{U}+\delta\dot{U}-\frac{1}{2}U(1-U^2)=f\cos\omega\xi, \qquad (4)$$

где:

$$U=\frac{U_1}{U_1^*}, U_1^*=\sqrt{1+\frac{2p_1\alpha_1\bar{t}^2}{c\omega_1^2}}, \xi=\bar{\omega}_1\tau,$$

$$\bar{\omega}_1^2=\omega_1^2+\frac{2p_1\alpha_1\bar{t}^2}{c}, \omega=\frac{\omega_2}{\bar{\omega}_1}, \delta=\frac{\mu_1}{\bar{\omega}_1}, f=\frac{2p_1\alpha_1\bar{t}^2A_2W_2^S}{cA_1W_1^SU_1^*\bar{\omega}_1^2}.$$

Исследованию хаотических колебаний осциллятора Дуффинга посвящена монография [7]; областью, представляющей интерес для исследования, является: $\omega=0{,}8, \delta=0{,}15, 01\le f\le 0{,}3$. 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, ω=0,8333, δ=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

$$m=1,\ \mu_1<0,\ \mu_2>0,\ d_i-a_i>0,\ i=1,2,\ \eta_i=(b_i+e_i)/3b_i,$$

$$\omega_i^2=(d_i-a_i)\bar{t}-\frac{p_i\alpha_i}{c}\bar{t}^2,\ A_i=\sqrt{\frac{(-1)^i\mu_1}{3\bar{t}b_i(W_i^S)^2}},\ X_i=A_iU_i,$$

из системы (2) получим два взаимосвязанных нелинейных осциллятора:

$$\ddot{U}_1-\mu_1(1-U_1^2)\dot{U}_1+\omega_1^2U_1+\mu_1\eta_1U_1^3=\frac{p_1\alpha_2\bar{t}^2}{c}\sqrt{\frac{\mu_2b_1}{\mu_1b_2}}U_2,$$

$$\ddot{U}_2-\mu_2(1-U_2^2)\dot{U}_2+\omega_2^2U_2+\mu_2\eta_2U_2^3=\frac{p_2\alpha_2\bar{t}^2}{c}\sqrt{\frac{\mu_1b_2}{\mu_2b_1}}U_1. \qquad (5)$$

Частный случай этой системы уравнений (μ_2<<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»

$\ddot{U}+\delta(1+\Delta U^2)\dot{U}-U(1-U^2)=f\cos\omega\tau,\ \Delta\geq0,\ \delta\geq0,\ f\geq0.$

Это уравнение можно записать в виде двумерной автономной системы с единственной гиперболической точкой под действием периодического возмущения

$$\vec{x}=\vec{f}_0(\vec{x})+\varepsilon\vec{f}_1(\vec{x}_1,\tau),$$

здесь

$$\vec{x}=(U,\dot{U}),\ \vec{f_0}=(f_{01},f_{02})=(\dot{U},U-U^3),$$
$$\vec{f_1}=(f_{11},f_{22})=(0,\bar{f}\cos\omega\tau-\bar{d}(1+\Delta U^2)\dot{U}),$$
$$\varepsilon\bar{f}=f,\quad \varepsilon\bar{\delta}=\delta,\quad \varepsilon\ll 1.$$

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

$$U_0=\frac{\sqrt{2}}{ch\tau},\ \dot{U}_0=-\frac{\sqrt{2}sh\tau}{ch^2\tau}.$$

Сепаратрисы могут пересекаться в бесконечном числе точек, и это явление, впервые обнаруженное Пуанкаре, приводит к появлению областей с хаотическим поведением траекторий.

Введем функцию:

$$\Psi(\tau_0)=-\int_{-\infty}^{\infty}\left\langle f_0,f_1\right\rangle d\tau=-\int_{-\infty}^{\infty}\left[\bar{f}\dot{U}_0(\tau-\tau_0)\cos\omega\tau-\right.$$
$$\left.-\bar{\delta}(1+\Delta U_0^2(\tau-\tau_0))\dot{U}_0(\tau-\tau_0)\right]d\tau=\sqrt{2}\bar{f}\pi\omega\frac{\sin\omega\tau_0}{ch\left(\frac{\pi\omega}{2}\right)}+\frac{4}{3}\bar{\delta}\left(1+\frac{4}{5}\Delta\right),$$

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 решений. 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 $(\bar{f},\omega)$.

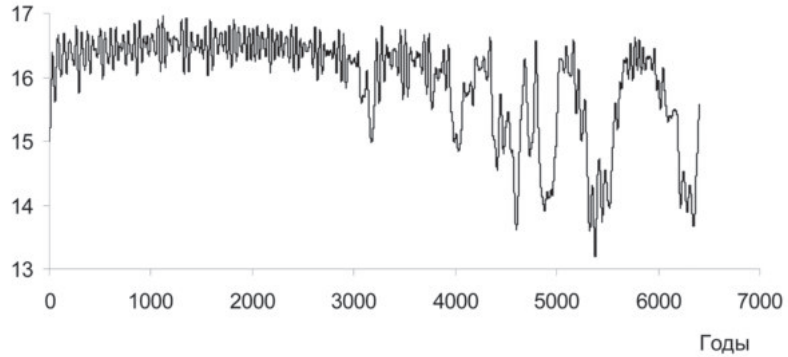


Рис. 1. Глобальная температура приземного слоя атмосферы, полученная методом математического моделирования (хаотическая реализация детерминированного процесса)

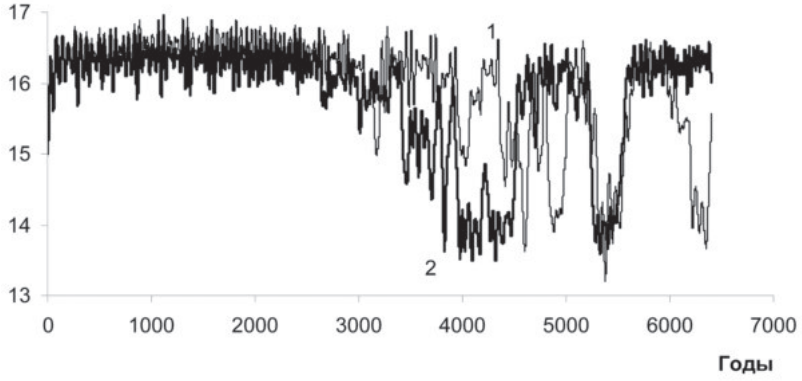


Рис. 2. Глобальная температура приземного слоя атмосферы, иллюстрирующая существенную зависимость от начальных условий: 1 – при U˙1(0)=0,5; 2 – при U˙1(0)=0,49999

Нелинейная система (2) при N=6 (в этом случае учитывалось влияние увлажненности шести континентов на планетарное альбедо Земли) исследовалась численными методами. Приведем конкретный вариант системы, состоящей из 14 уравнений первого порядка и имеющей хаотические решения:

$$\ddot{U}_i-\mu_i(1-U_i^2)\dot{U}_i+\omega_i^2U_i+\mu_i\eta_iU_i^3=\frac{p_i\bar{t}T_S}{W_i^sA_i}(\dot{\theta}+\theta),\quad i=1,2,3,$$

$$\ddot{U}_i+\mu_i\dot{U}_i+\omega_i^2U_i(1-U_i^2)=\frac{p_i\bar{t}T_S}{W_i^sA_i}(\dot{\theta}+\theta),\quad i=4,5,6,$$

$$\dot{\theta}+m\theta=\frac{\overline{t}}{cT_s}\left(\sum_{i=1}^{6}\alpha_i W_i^S A_i U_i\right)+\zeta\overline{C},$$

$$\Lambda\dot{\bar{C}}+\bar{C}=N\theta \qquad (6)$$

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^s_i=3 м, глобальная температура атмосферы T_s=288 K, теплоемкость верхнего слоя океана c=9,5 (Вт/м)год, $\bar{t}$=10 лет, m=0,85, $\bar{n}$=6,6; Δ=1, ζ=0,01. Начальные условия для системы (6) были приняты следующими

$$U_i(0)=0{,}1,\ \dot{U}_i(0)=0{,}5,\ \theta(0)=0,\ \bar{C}\,(0)=0{,}01.$$

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 эемного шара и влажнности 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.

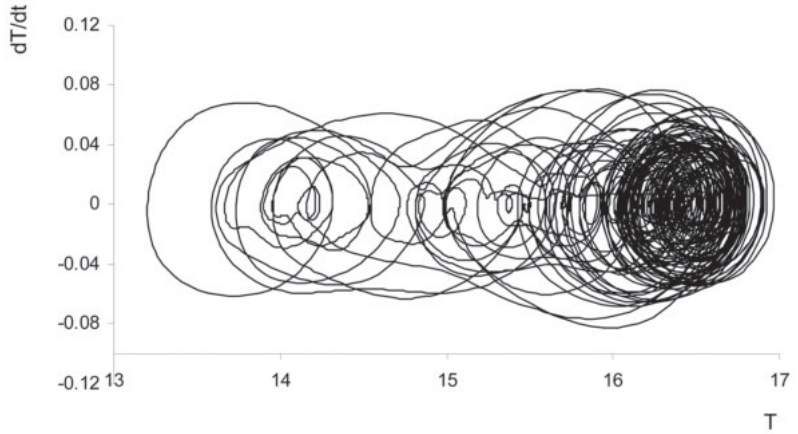


Рис. 3. Фазовый портрет хаотических колебаний температуры в координатах температура – ее производная

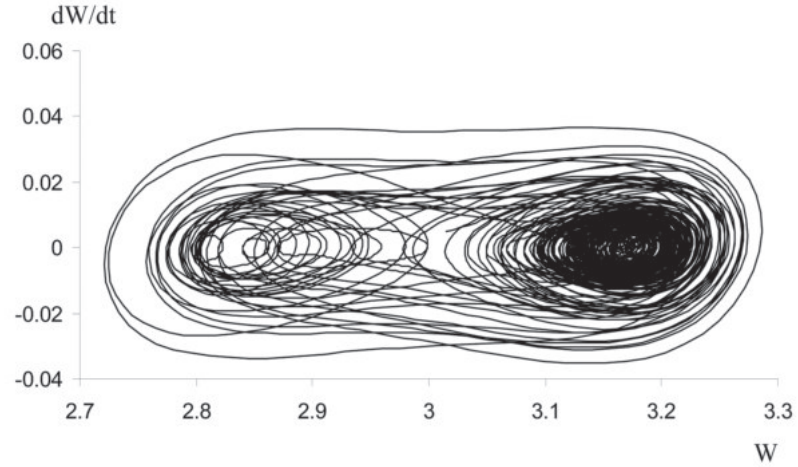


Рис. 4. Фазовый портрет хаотических колебаний влагозапаса суши в координатах влагозапас – ее производная

Таким образом, глобальные потепление и похолодание, а также резкие измененииия 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.

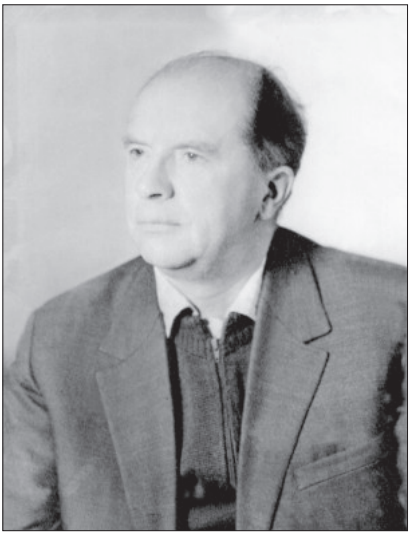
9. Козлов В.В. Расщепление сепаратрис и рождение изолированных периодических решений в гамильтоновых системах с полутора степенями свободы. // УМН. 1986. Т. 41. №5. С. 177–178.

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 оказалась 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 изучения[1]

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 приближенно оцененные почти для 50% площади СССР (Карта модулей..., 1965), достигают 6–7 тыс. $м^3$/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 земледеления 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* – слабосолоноватые 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* – среднесолоноватые 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* – сильносолоноватые 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.

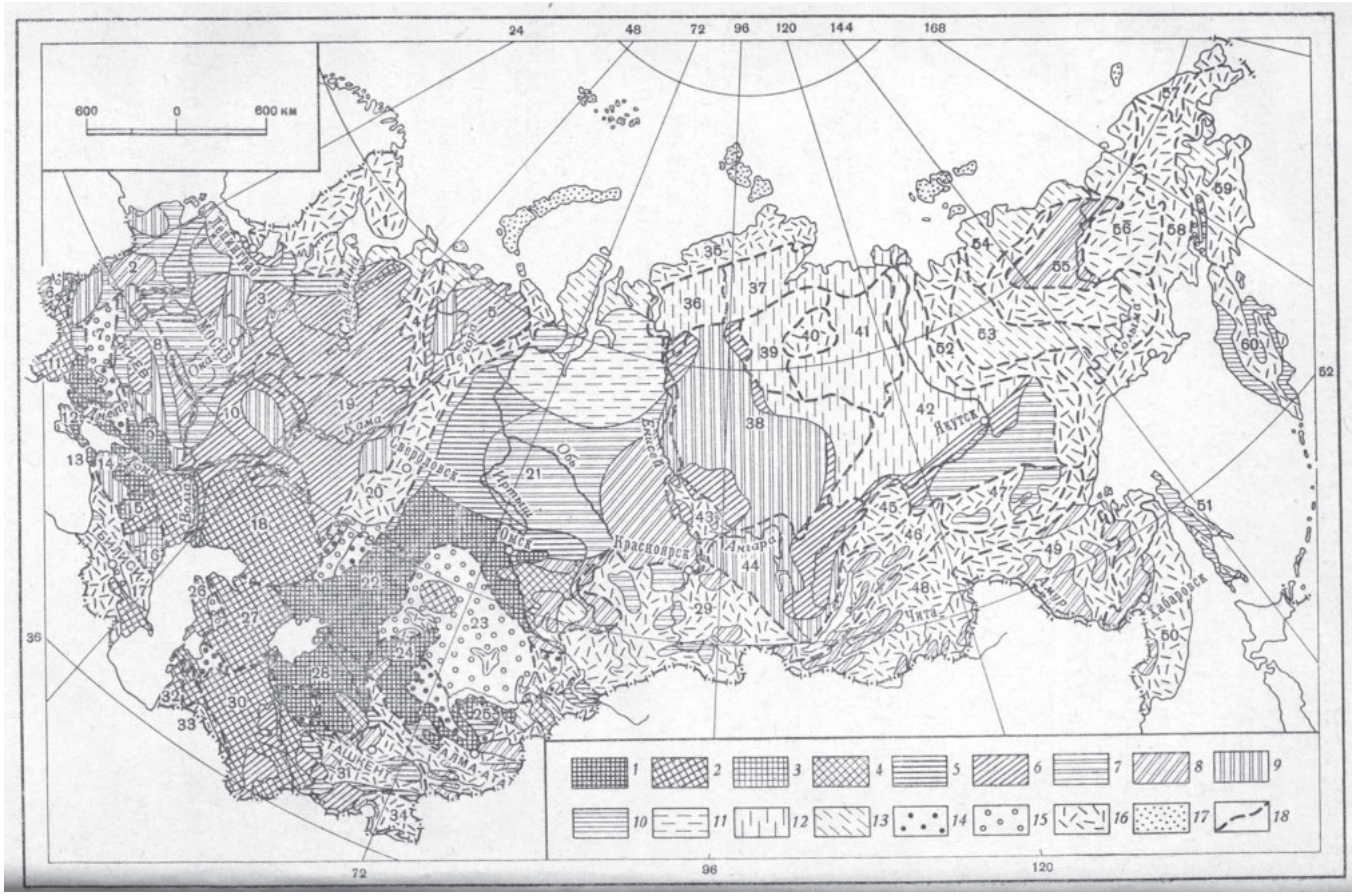
Отметим, что в США, где ряд районов, прежде всего на засушливом Западе, испытывает острый недостаток пресных вод, такие исследования ведутся весьма интенсивно. Выделенные конгрессом на эти исследования ассигнования достигают 200 млн долл. (Клячко, 1966). В США составлен ряд региональных обзоров ресурсов 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 н 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, Чу-Сарысуйский, Сырдарьинский, преобладают солоноватые воды,

Карта распространения и условий залегания солоноватых и соленых подземных вод на территории СССР. (Составлена А.А. Буслаевой 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»).


600 0 600 км
24
48
72
96
120
144
168
36
62
Ленинград
Москва
Киев
Минск
Одесса
Горький
Свердловск
Челябинск
Омск
Новосибирск
Красноярск
Иркутск
Якутск
Чита
Хабаровск
Амур
Обь
Иртыш
Лена
Енисей
Ташкент
Алма-Ата
Каспийское море
Аральское море
Оз. Балхаш
1 2 3 4 5 6 7 8 9
10 11 12 13 14 15 16 17 18

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 поды 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 км^2, в сумме составляют величину порядка 700–1100 м^3/сек, что соответствует среднему модулю эксплуатационных ресурсов 0,2–0,3 л/сек*км^2.

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 слабосолоноватых (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 сильносолоноватых вод превышают ресурсы пресных и слабосолоноватых 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 (рассредоточенного) 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 водопроводимости; 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 меньше 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.: Обессоливание 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. Колычев 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. И, №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. Preliminery 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-влагообмена 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 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 мелководий[1]

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 крутые, 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-

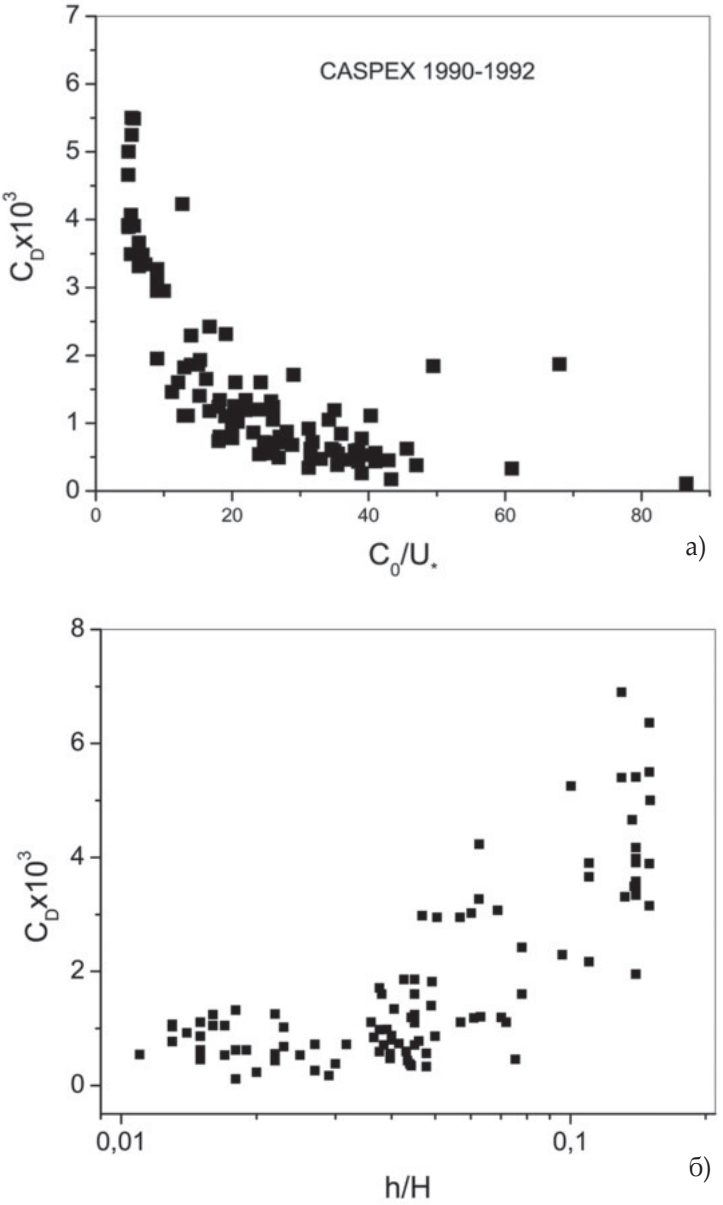
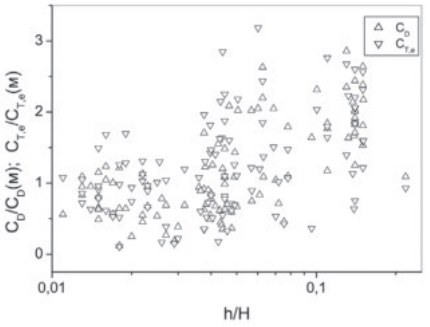
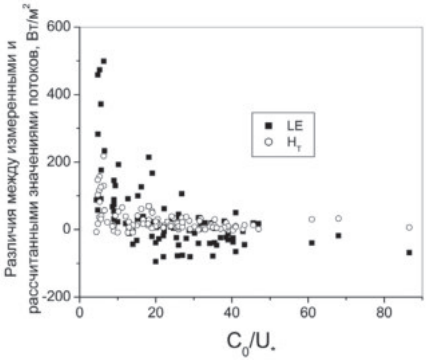


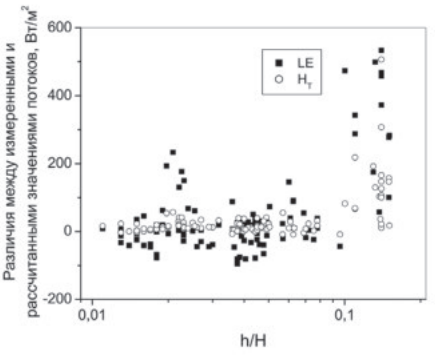
Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления водной поверхности от динамического состояния поверхностного волнения (C0/U*), (а) и параметра h/H, (б) по данным эксперимента КАСПЭКС 1990–1992 гг.



а)



б)



в)

Рис. 2. Зависимость отношения коэффициентов сопротивления CD и испарения CT,e, измеренных на мелководье, к их рассчитанным значениям CD(м) и CT,e(м) по модели для глубокого моря (формулы 4, 5) от параметра h/H (а), и различий между измеренными на мелководье скрытого (LEM) и явного (HTM) потоков тепла с одной стороны и рассчитанными их значениями (LEC, HTC) по модели для глубокого моря (формулы 4, 5) от динамического состояния поверхностного волнения (C0/U*), (б) и параметра h/H, (в)

теорологическая информация использовалось для расчета значений поверхностных потоков импульса, тепла и влаги с помощью балк-параметризаций 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 гармоники 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:

$$C_{T,e}=F_{T,e}(z/h_S;\ z/L;\ h_S/\delta_v;\ Pr_T;\ Pr_e), \qquad (1)$$

Если принять числа Прандтля постоянными и равными между собой ($Pr_T=Pr_e=Pr$=0,1), а также зафиксировать высоту измерения (например, z=10 м), можно переписать (1) в виде

$$C_{T,e}=F_{T,e}(z/L;\ h_S/\delta_v). \qquad (2)$$

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

$$C_{T,e}=F_{T,e}(z/L;\ z_0 u_*/v). \qquad (3)$$

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.

$$E = C_{T,e}^{N}\rho U_Z \Delta q_{SZ}\cdot\begin{cases} A\rho c_P \Delta q_{SZ}^{4/3}\left[\dfrac{\beta \nu_E^2 g}{\nu}(1+b/Bo)\right]^{1/3} & при\ \ U_{10}<3м/с \\ (1-z/L)\left[1+10^{-2}(z_0 u_*/\nu)^{3/4}\right] & при\ \ z/L<0 \\ \left[1/(1+3{,}5z/L)\right]\cdot\left[1+10^{-2}(z_0 u_*/\nu)^{3/4}\right] & при\ \ z/L>0 \end{cases} \quad (4)$$

$$H_T = C_{T,e}^{N}\rho c_P U_Z \Delta T_{SZ}\cdot\begin{cases} A\rho c_P \Delta T_{SZ}^{4/3}\left[\dfrac{\alpha \nu_T^2 g}{\nu}(1+b/Bo)\right]^{1/3} & при\ \ U_{10}<3м/с \\ (1-z/L)\left[1+10^{-2}(z_0 u_*/\nu)^{3/4}\right] & при\ \ z/L<0 \\ \left[1/(1+3{,}5z/L)\right]\cdot\left[1+10^{-2}(z_0 u_*/\nu)^{3/4}\right] & при\ \ z/L>0 \end{cases} \quad (5)$$

В (4–5) $\alpha=-(\partial h\rho/\partial T)_{p,q}=1/T_z$ – коэффициент теплового расширения воздуха, $\beta=-(\partial h\rho/\partial q)_{p,T})\approx 0{,}61$, 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 K), 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:

$$U_*^{SW}=U_*+U_*\cdot k_U^{SW}\cdot\frac{h}{H}\approx U_*(1+1{,}6h/H)$$
$$H_T^{SW}=H_T+H_T\cdot k_T^{SW}\cdot\frac{h}{H}\approx H_T(1+2/h)H \qquad (6)$$
$$E^{SW}=E+E\cdot k_E^{SW}\cdot\frac{h}{H}\approx E(1+2/h)H$$

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 %.

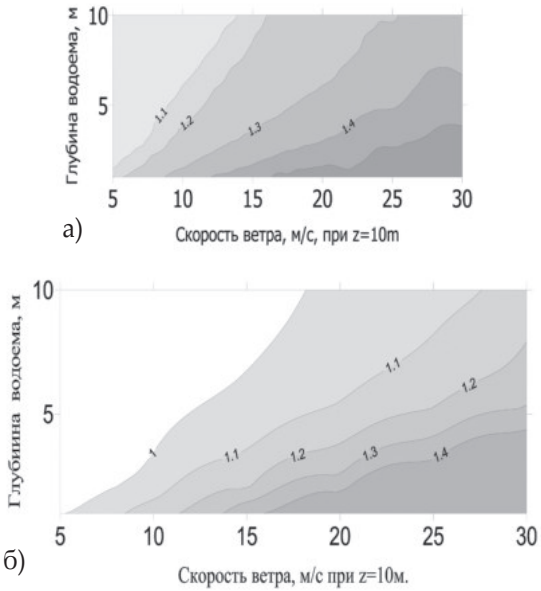


Рис. 3. Коэффициент интенсификации испарения и теплообмена водной поверхности с атмосферой (а) и динамической скорости ветра (б) при различной скорости ветра на высоте z=10 м и при разной глубине водоема

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 прибоя ($x \le L^{(-)}$), где выполняются условия ($h^{(-)}(x)=H^{(-)}(x)\cdot f(\mathrm{tg}\alpha)\approx 0{,}5H^{(-)}(x)$).

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 прибрежной зоны можно записывать: $\dfrac{\lambda^{(+)}}{H^{(+)}}= 2\pi \approx 6{,}28$.

Запишем уравнение энергетического баланса в прибрежной зоне при ($\dfrac{\lambda^{(+)}}{H^{(+)}}= 2\pi \approx 6{,}28$) в виде:

$$\frac{\partial h^2}{\partial x} = \frac{h^{(+)2}}{L^{(+)}} F(tg\alpha). \qquad (7)$$

Найдем значение функции: $F(\mathrm{tg}\alpha)$:

$$\int_{L^{(+)}}^{X} \frac{\partial h^2}{\partial x} dx = \frac{h^{(+)2}}{L^{(+)}} \int_{L^{(+)}}^{X} F(tg\alpha) dx. \quad (8)$$

После интегрирования получаем:

$$h^2(x) = h^{(+)2} - h^{(+)2} \cdot \frac{(L^{(+)} - x)}{L^{(+)}} F(tg\alpha). \quad (9)$$

При $x=L^{(-)}$ получаем:

$$h^{(-)}=0{,}5 \cdot H^{(-)}=0{,}5 \cdot tg\alpha \cdot L^{(-)}. \quad (10)$$

Перепишем (9) в виде:

$$h^{(-)2} = h^{(+)2} - h^{(+)2} \cdot \left(\frac{L^{(+)} - L^{(-)}}{L^{(+)}}\right) F(tg\alpha) = (0{,}5 \cdot tg\alpha)^2 \cdot L^{(-)2}. \quad (11)$$

Примем $F(\mathrm{tg}\alpha)=c$, тогда**:**

$$h^{(-)2} = h^{(+)2} \cdot \left[1 - c \cdot \left(1 - \frac{L^{(-)}}{L^{(+)}}\right)\right]. \quad (12)$$

При $\frac{L^{(-)}}{L^{(+)}} << 1$ 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 $L^{(+)} = \frac{H^{(+)}}{tg\alpha} = \frac{g}{\omega^2 tg\alpha} = \frac{\lambda^{(+)}}{2\pi tg\alpha} \approx 2 \frac{U_Z^2}{g \cdot tg\alpha}$, получаем необходимое выражение для расчета высоты волн в прибрежной зоне в окончательном виде:

$$h(x) = 0{,}16 \frac{U_Z^2}{g} \cdot \left[1 - c \cdot \left(1 - \frac{x}{2U_Z^2} g \cdot tg\alpha\right)\right]^{1/2}. \quad (15)$$

Зависимость (15) в комбинации с эмпирической зависимостью (6) позволяет вычислять значения потоков тепла, влаги и количест-

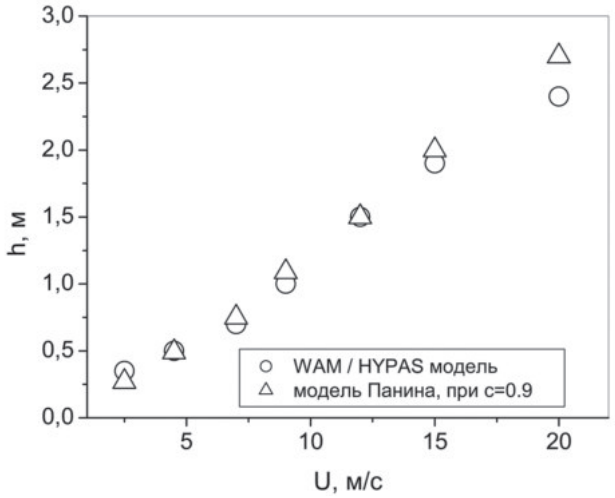


Рис. 4. Результаты сопоставления наших расчетов высоты волн с данными, полученными по модели WAM (WADIM Group, 1988) при скоростях ветра, меняющихся от 2,5 м/с до 20 м/с

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

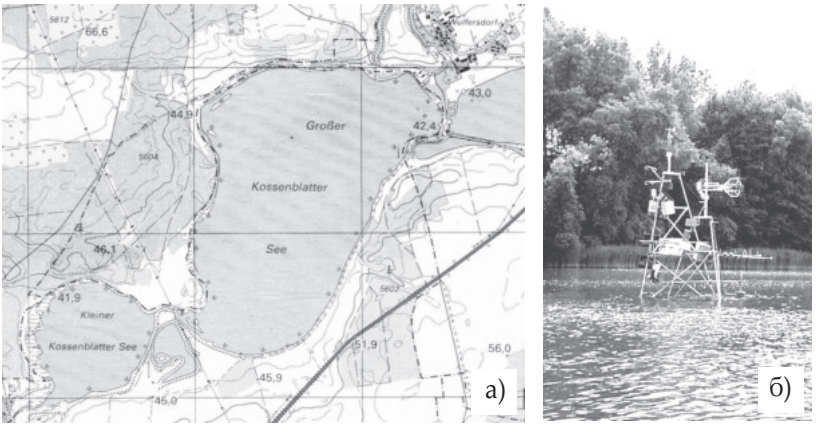


Рис. 5. Большое Коссенблатское озеро (а) и вид мачты для измерения вертикальных потоков тепла, влаги и импульса в сочетании с радиационными потоками (б), расположенной в озере на глубине 2,5 м

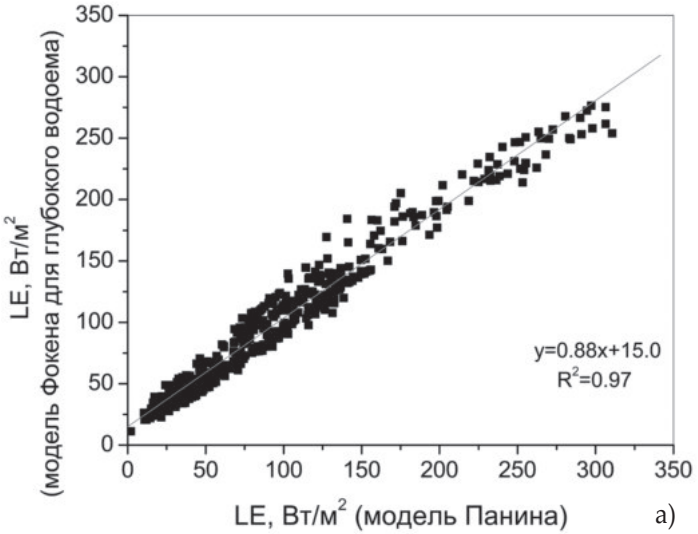
располагать информацией о значениях этих потоков в их открытой глубоководной зоне. Эта информация может быть получена в результате проведения эксперимента на глубокой воде или путем использования данных модельного расчета значений указанных потоков (см. формулы 4, 6).

Сопоставление результатов модельных расчетов с экспериментальными данными

Мелководный водоем

Данные для проверки модели тепло-влагообмена 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



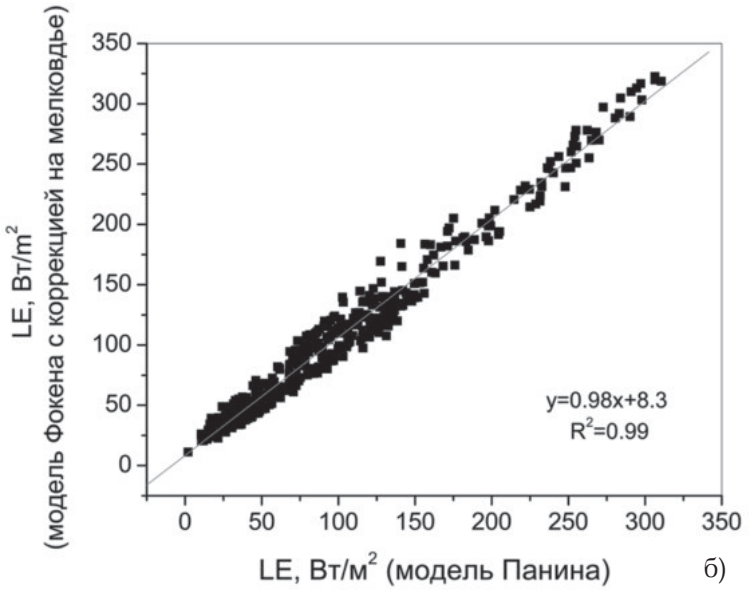


Рис. 6. Сопоставление результатов расчета скрытого теплообмена при помощи модели Панина с моделью Фокена без коррекции на мелководную интенсификацию испарения (а) и с коррекцией на мелководную интенсификацию испарения, (б) для Большого Коссенблатского озера в течение эксперимента LITFASS-98

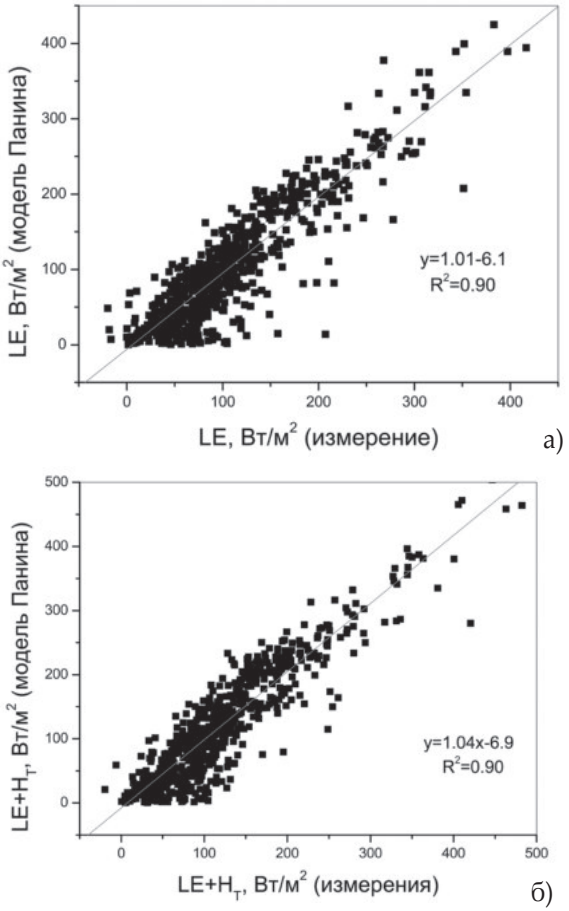


Рис. 7. Сопоставление результатов прямых измерений и расчета скрытого теплообмена ( ) и результирующего теплообмена ( ) при помощи модели Панина для Большого Коссенблатского озера в течение эксперимента LITFASS-2003 для ветров направлений от 180° до 330°

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:

$$10^3 \cdot C_D = a + bU_{10} \qquad (16)$$

Наиболее часто зависимость (16) используется со следующими значениями для коэффициентов a и b [27]:

$$10^3 \cdot C_D = 0{,}75 + 0{,}067U_{10}.$$

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. Виринга [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 значении коэффициента сопротивления вод-

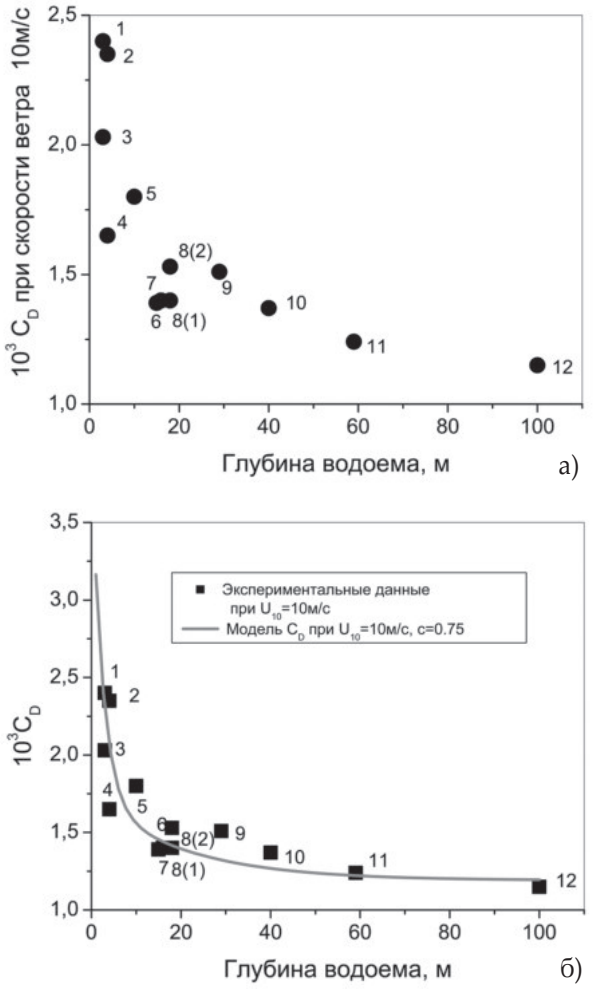


Рис. 8. Зависимость коэффициента сопротивления ( ) от глубины моря при скорости ветра U10=10м/с (а). Точки 1–12 – экспериментальные данные: 1 – Wieringa, 1972, озеро Флево (глубина в точке измерения 3 м); 2 – Panin et al., 1996, Северный Каспий (глубина в точке измерения 4 м); 3 – Graf et al., 1984, зеро 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 HEXMAX, Северное море (глубина в точке измерения 18 м) (Smith et al, 1992); 8 (2) – эксперимент HEXMAX, 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 (Kanta и 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 это 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 развитом волнении может достигать предельного значения 1/7.

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 предустьевого 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 сгонно-нагонными колебаниями. В Северном Каспии обширные мелководья, малые уклоны дна и суши, конфигурация береговой черты, активная ветровая обстановка создают благоприятные условия для развития значительных сгонно-нагонных колебаний уровня.

Согласно рис. 3а 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

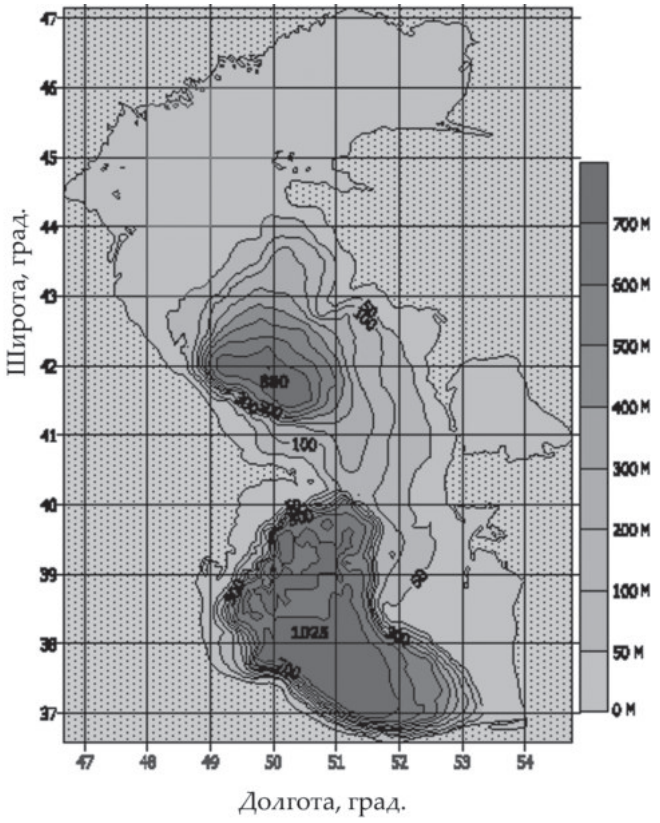


Рис. 9. Батиметрическая карта Каспийского моря

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).

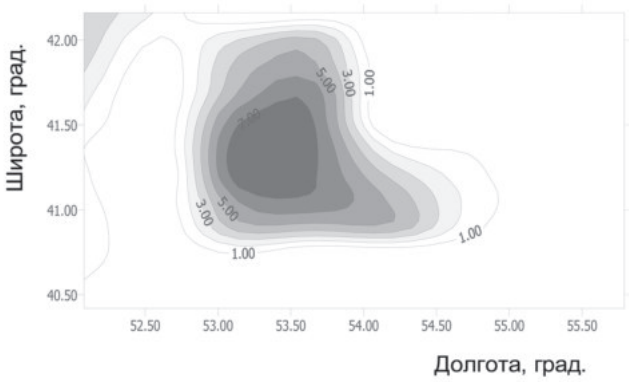


Рис. 10. Карта глубин Кара-Богаз-Гола летом в 1999 г. (по данным Д.А. Лаврова)

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 среднемноголетних (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-

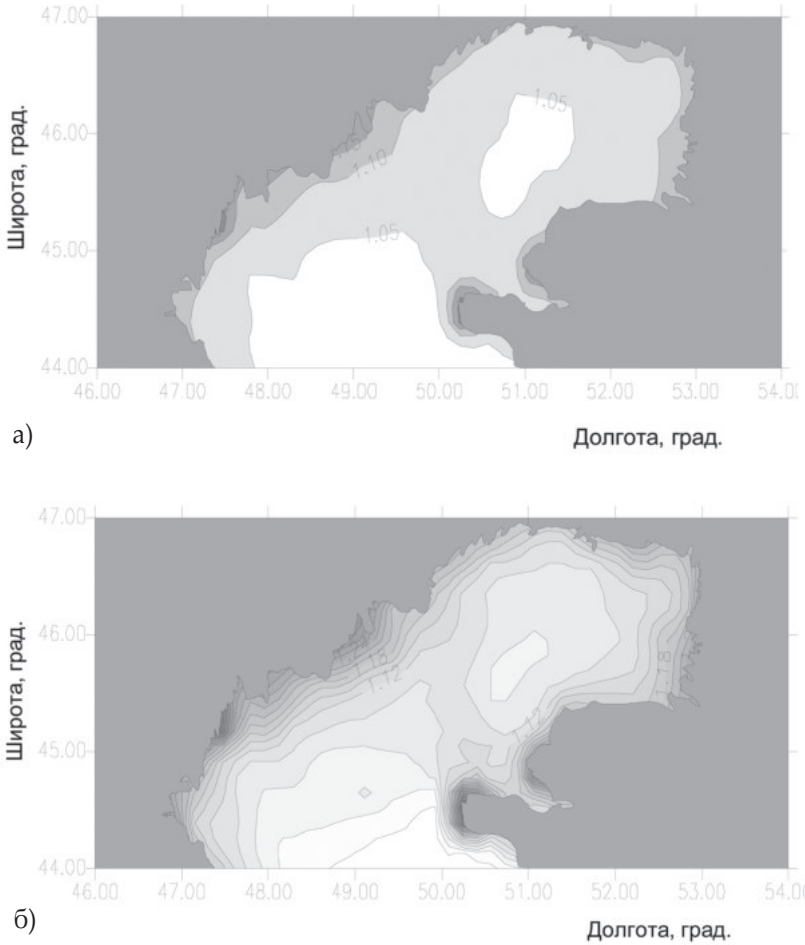


Рис. 11. Результаты расчета интенсификации испарения Северного Каспия при 10 м/с (а) и при 20 м/с (б)

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.

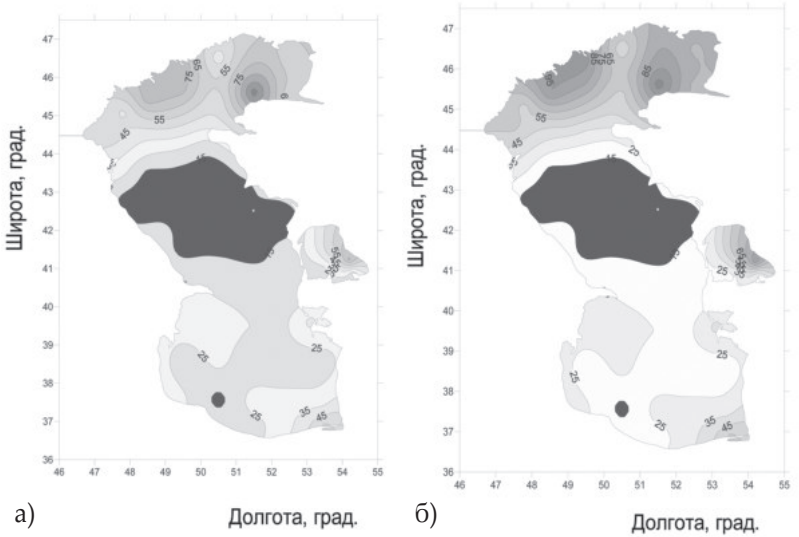


Рис. 12. Распределение среднемноголетних (за период с 1904 по 1987гг.) значений скрытой теплоты по акватории Каспийского моря в апреле без учета (а) и с учетом (б) интенсификации вертикального обмена за счет глубины

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

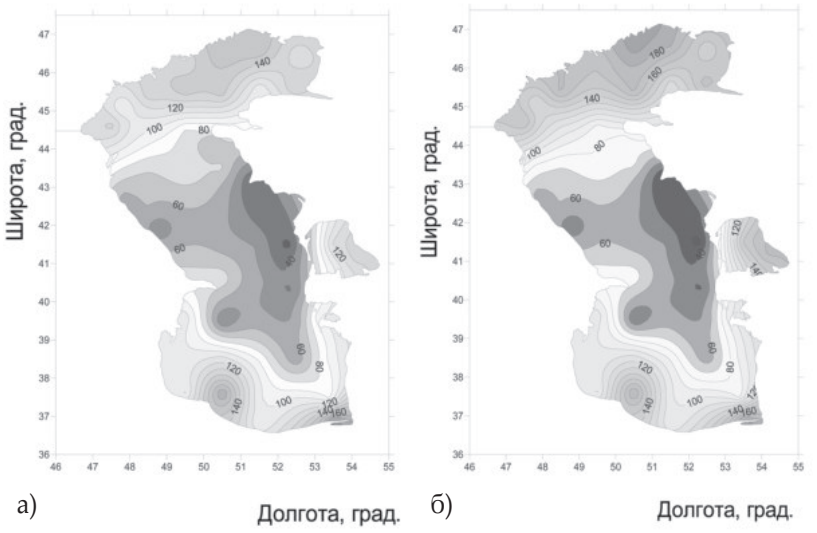


Рис. 13. Распределение среднемноголетних (за период с 1904 г. по 1987 г.) значений скрытой теплоты по акватории Каспийского моря в июле без учета (а) и с учетом (б) интенсификации вертикального обмена за счет глубины

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 (на примере 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, Гидрометеоиздат, ч. 1, 1992. 639 с.

2. Панин Г.Н. Тепло- и массообмен межу 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 fьr 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. Китайгродский 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 тепломассобмен 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 Variabilitдt des Windreibungs-koeffizienten ьber See in der Nдhe einer Kьste 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 see 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. Гидрометеоиздат, 1985. 256 с.

23. Boorngen 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. Reistad, L. Zambresky, J.A. Ewing): The WAM Model – A Third Genaration 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, Vol1. 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. Simlified 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. Somlyody 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 вод[1]

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 семидесятых 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; Тютков, 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.
- Аккумулирование 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]:

$$\{\min \bar{K}_\varepsilon / A_\varepsilon \le B\},\ 0 \le \varepsilon \le 1\}, \quad (1)$$

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; Лотов и 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 поддержи 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 водоохранных 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.

Экономических 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 водоохранных 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 регионального 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

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 канав 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 несовершенс-

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 водоохранных 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 септитенках 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-

Таблица 1

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 летнее-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);

Таблица 3

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			
		Механическая	Биологическая	Биохимическая	Физико-химическая
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 ⅓ 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 водоохранных 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.Л. Потоковая модель обоснования параметров элементов и водоохранных мероприятий водохозяйственной системы // Водные ресурсы. 1989. №6. С. 146–157.

9. Кузин А.К., Станишевский 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.: Гидрометеоиздат. 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 водоохранных 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. Технико-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: Agrodat, 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. Somlyody, 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. Somliody 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 натурных 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 натурных 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 натурных 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 двухмерной плотности распределения вероятностей. Задача в такой постановке впервые была сформулирована Д.Я. Ратковичем, им был рекомендован тип двухмерного 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 двухмерных 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 уровенного 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.:* Гидрометеоиздат. 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 гидрологии[1]

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 ($\bar{r}$=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 сгонно-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 натурных 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 уровенного режима 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 корреляционные 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 км^3/год, т.е. на 70 км^3/год (~30% среднемноголетнего 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 уровенного 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 затушевать 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 одномодального 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 натурных и лабораторных исследований и обоснованного выбора границ применимости указанных выше подходов.

Нельзя обойти молчанием влияние изменений климата на уровенный 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 уровенного 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 Ладожского 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 уровенного 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 половодий 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 водоподачи 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 методику 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 следует иметь в виду, что календарный метод характеризуется ошибками, обусловленными нерепрезентативностью имеющегося временного ряда наблюденных значений стока. Эти погрешности оказываются тем большими, чем короче ряд наблюдений. В обобщенных методах расчета ошибки обусловливаются 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 обусловливается 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 ограничение 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 среднемноголетнем 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, обусловливающая 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 перемешиваемых 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 возрастать.

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 натурных наблюдений, а также вероятностное обоснование методики соответствующих замеров и обработки их результатов.

В первую очередь надо обеспечить репрезентативность отбираемых проб взвешенных наносов, обусловливая 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 раздельный 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 солености вод в море (из Дона и Кубани поступает практически пресная вода, а через Керченский прол. – соленая черноморская). Однако в целом за год поступление пресных вод превышает приток соленых. Обработка материалов наблюдений за притоком и соленостью 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 солености 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 солености Днепро-Бугского и Днестровского лиманов этот фактор оказывается ведущим.

Озеро Балхаш образует две котловины, соединенные прол. Узунрал. Проточный режим западной части озера обусловливает в ней малую минерализацию вод (~ 1.5‰), что позволяет использовать их в народном хозяйстве. В восточной части соленость 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 солености 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 моделей 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 гидрофизики, 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 строительный 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 водотоках[1]

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 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°С. 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 следую-

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 т/м^3, то отношение толщин снега и льда получится равным $h_c/h_л$=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:

$$h_л=\lambda_л\cdot\tau_{лп}/S_л \qquad (1),$$

где $h_л$ – толщина льда, $\tau_{лп}$ – температура верхней поверхности льда, $\lambda_л$ – коэффициент теплопроводности льда.

При установившемся теплообмене и неизменности атмосферных условий толщина ледяного покрова определяется расходом тепла $S_л$, 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

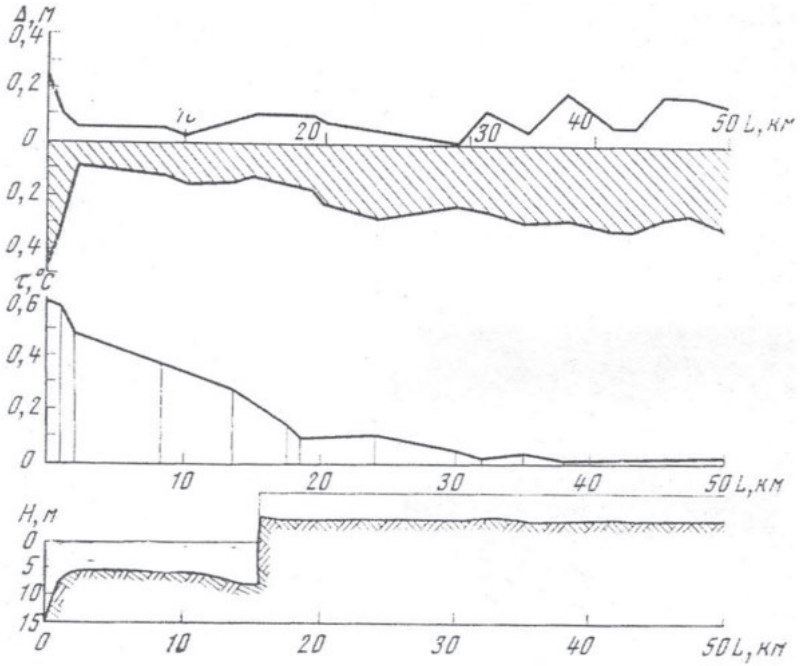


Рис. 1. Продольный профиль, разрез ледяного покрова и температура воды в месте выхода канала из Иваньковского водохранилища

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 точения, 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:

$$(S_л)_{h\min} < S_л,$$

где теплоотдача $(S_л)_{h\min}$ 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°С (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:

$$S_0 > (S_0)_{\tau 0=0},$$

где $(S_0)_{\tau 0=0}$ – предельно возможный теплоприток из толщи воды к открытой водной поверхности, имеющей температуру 0°С.

При заданной метеорологической и гидравлической обстановке величины теплопритока и теплоотдачи S_0, $S_л$ и $(S_0)_{\tau 0=0}$ 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.

$$(S_л)_{h\min} = S_0.$$

2. Теплоприток к открытой водной поверхности $(S_0)_{\tau 0=0}$ больше теплопритока к нижней границе льда $S_л$:

$$(S_0)_{\tau 0=0} > S_л.$$

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:

$$S_0 > (S_0)_{\tau 0=0} \quad (2)$$

2. Полынья образуется, если она отсутствовала, и поддерживается, если она образовалась:

$$S_л > S_0 \quad (3)$$

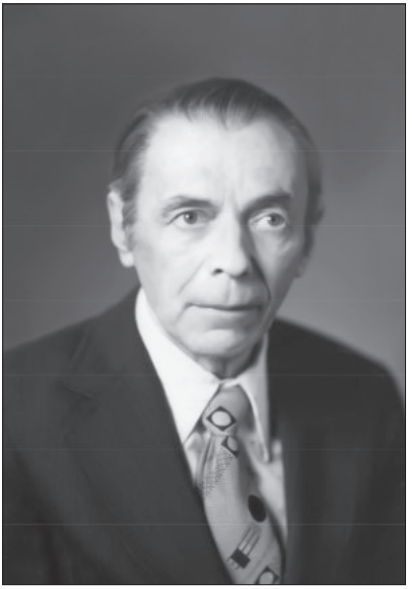
3. Ледяной покров удерживается, если он образовался, полынья сохраняется, если она существовала:

$$(S_0)_{\tau 0=0} > S_0 > S_л \quad (4)$$

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-подо 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 частицы[1]

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:

$$\rho g i \bar{u}(1-\bar{s}) = \frac{d}{dy}\left[\rho(1-\bar{s})\overline{u'v'}\right]\bar{u} + (\rho_t - \rho) g w \bar{s}(1-\bar{s}). \qquad (1)$$

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, Гидрометеоиздат, с. 180 – 188.

Уравнение энергии для твердой фазы, используемое в гравитационной теории, имеет вид:

$$\rho_{\div} g i \bar{u}\bar{s} = \frac{d}{dy}\left[\rho_{\div}\bar{s}\bar{u}'\bar{v}'\right]\bar{u} - (\rho_{\div} - \rho) g w \bar{s}(1-\bar{s}), \qquad (2)$$

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 $(\rho_{\div}-\rho)gw\bar{s}(1-\bar{s})$ 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

$$\frac{d}{dy}(\bar{u}\tau) = \frac{d\bar{u}}{dy}\tau + \frac{d\tau}{dy}\bar{u}, \qquad (3)$$

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 $(\rho_{\div}-\rho)gw\bar{s}(1-\bar{s})$, выражающая в гравитационной теории работу взвешивания, при внесении небольшой поправки должна представлять, по существу, как раз диссипацию энергии $(\rho_{\div}-\rho)gw\bar{s}$, вызываемую перемещением частиц массой $\rho_{\div}\bar{s}$ 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 раздельную запись баланса энергии для двух фаз, являющуюся, 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

$$\rho_1 g i_1 = \frac{d\tau_1}{dy}. \qquad (4)$$

будет равна $\frac{d\bar{u}_1}{dy}\tau_1$.

Часть этой энергии ($Д_1$) 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:

$$\frac{d\bar{u}_1}{dy}\tau_1 = \ddot{A}_1 + T_1. \qquad (5)$$

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

$$\int_h T_1 dy = 0. \tag{6}$$

Обозначая теперь чертой сверху величины, осредненные по глубине h, и подразумевая, что, кроме того, всегда выполняется осреднение по времени, будем иметь[2]

$$\ddot{A}_1 = \rho g i_1 \bar{u}_1 + g i_1 (\rho_{\div} - \rho)\overline{su}_1 = \rho g i_1 \left[\bar{u}_1 + (\rho_{\div}/\rho - 1)\overline{su}_1\right]. \tag{7}$$

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

$$\ddot{A}_1 = \rho g i \bar{u} - \rho g i (\bar{u}_1 - \overline{su}_1), \tag{8}$$

а разность диссипации двух рассмотренных потоков

$$\Delta\ddot{\bar{A}} = \ddot{\bar{A}}_1 - \ddot{\bar{A}} = \rho g \bar{u}(i_1 - i) + \rho_{\div} g i_1 \overline{su}_1. \tag{9}$$

Отнеся эту величину к единице веса протекающей жидкости, найдем, что

$$\frac{\Delta\ddot{\bar{A}}}{\rho g \bar{u}} = i_1 - i + i_1(\rho_{\div}/\rho)s_p, \tag{10}$$

---

[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 $\ddot{A}_1$ не противоречит уравнению (5), так как $\ddot{A}_1 = \rho g i_1 \bar{u}_1 = -\frac{d\overline{\tau_1}}{dy} u_1 = \frac{d\overline{u_1}}{dy}\tau_1$.

где $S_p=\frac{\overline{su_*}}{u_1}$ – концентрация взвеси, вычисляемая по расходу наносов $\overline{su_1}$ и расходу жидкости $\bar{u}_1$, i_1 и i – гидравлический уклон для одного и другого потоков.

Заметим, что зависимость добавочной диссипации $\Delta\bar{\ddot{A}}$ 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 $\Delta Д$, 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 $\Delta\bar{\ddot{A}}$, вызываемую наличием взвешенных тяжелых частиц, и сделаем попытку выяснить на основе простейших соображений о размерности общий характер действующих между этими величинами связей. Вначале допустим ради упрощения, что поле турбу-

3 Легко показать, что из выражения $\Delta\bar{\ddot{A}}=\rho g\bar{u}(i_1-i)$ вытекает неестественное соотношение $\bar{\ddot{A}}=(1+s_p)\bar{\ddot{A}}+(1+1/s_p)\Delta\bar{\ddot{A}}$, согласно которому роль дополнительной диссипации $\Delta\bar{\ddot{A}}$ должна уменьшаться с ростом концентрации.

лентных пульсаций скорости вполне характеризуется стандартом (по времени)

$$\sigma_v = \sqrt{\overline{V^2} - \overline{V}^2}$$

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 $\rho_ч$, плотности и вязкости жидкости ρ и μ.

В стационарных (в среднем) условиях (на единицу объема частицы)

$$E_1 = (\rho \sigma_v^3 / d)\, \phi \left[\frac{l}{d}, \frac{\mu}{\rho d \sigma_v}, \frac{\rho_÷}{\rho} \right], \qquad (11)$$

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 $u_* = \sqrt{ghi}$, а характерный размер турбулентных возмущений l приблизительно пропорционален глубине h, перепишем последнее соотношение в виде:

$$E_1 = \frac{\rho u_*^3}{d} f_1 \left(\frac{h}{d}, \frac{\rho d u_*}{\mu}, \frac{\rho_÷}{\rho} \right). \qquad (11)$$

Энергию, диссипируемую при равномерном осаждении твердой частицы относительно жидкости со скоростью w, представляющую «гравитационную» составляющую диссипации, можно определить по соотношению

$$E_2 = \frac{\rho w^3}{d} f_2 \left(\frac{\mu}{\rho d w}, \frac{\rho_÷}{\rho} \right), \qquad (12)$$

причем вид функции f_2 зависит от формы частицы.

Отсюда

$$E = E_1 + E_2 = \rho \frac{u_*^3 f_1 + w f_2}{2}, \qquad (13)$$

где E – полная энергия, расходуемая на поддержание движения частицы.

Согласно введенной выше гипотезе, средняя добавочная диссипация $\Delta\bar{\bar{A}}$ в нашей упрощенной схеме однородной «одномасштабной» турбулентности будет

$$\Delta\bar{\bar{A}} = \bar{s}E = \bar{s}\frac{\rho}{d} f_1 u_*^3 \left[1 + \frac{f_1}{f_2}\left(\frac{w}{w_*}\right)^3\right]. \qquad (14)$$

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 вида[4]:

$$i_1 = \phi\left[\bar{s}, \frac{\bar{u}}{\sqrt{gd}}, \frac{\mu}{\rho d^{3/2} g^{1/2}}, \frac{\rho_{\div}}{\rho}, \frac{h}{d}\right]. \qquad (15)$$

При отсутствии влияния вязкости и при неизменной плотности это выражение упрощается:

$$i_1 = \varphi\left[\bar{s}, \frac{\bar{u}}{\sqrt{gd}}, \frac{h}{d}\right]. \qquad (16)$$

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 $u_* = \sqrt{ghi}$; $\frac{u_*}{\bar{u}} \approx \sqrt{\lambda} = f\left(\frac{h}{d}\right)$, $E_2 = \rho g^{3/2} d^{1/2} f_2\left(\frac{\mu}{\rho d^{3/2} g^{1/2}}, \frac{\rho_{\div}}{\rho}\right)$

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 обшей картины поля пульсаций.

В каждом слое y=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

$$\tilde{E}_1 = \frac{\rho}{d}\sigma_v^3 \int_0^\infty \rho^{3/2}(\eta) f_1\left(\eta, \frac{\mu}{\rho d \sigma_v}, \frac{\rho_\div}{\rho}\right) d\eta . \qquad (17)^5$$

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

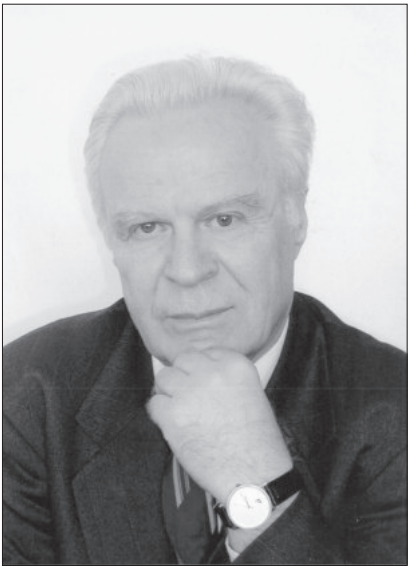
[5] Здесь $\rho^{3/2}(\eta)d\eta = \sigma_v^3(\eta, \eta+\delta\eta)/\sigma_v^3$.

$p(\eta)$, 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 применении 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 ученом звании 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. Хубларяном 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. Хубларян 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 организаторам науки; мудрым, благожелательным, замечательным человеком; образцом целеустремленности, мужества, стойкости, преданного служения науке.

В.Н. Зырянов (ИВП РАН)

Водные проблемы в XXI веке[1]

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 км^3/год, в России 4270 км^3/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. м^3/год, при этом в Российской Федерации – около 30 тыс. м^3/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. м^3/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 км^3/год, безвозвратное – 2280 км^3/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 км^3/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 ⅕ 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 ¼ 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 кмэ/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-Нинью 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 $C0_2$ 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 антропогенною фактора. Эта мысль в отчете обоснована следующими данными. В XX в. основная часть (0,53 °С) общего роста (0,6 °С) глобальной температуры пришлась 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 зто 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°С 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°С 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 °С 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 дол/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, наводнении 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 н 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 но 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 находились 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-

лища, 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 $м^3$ мчался со скоростью более 10 м/с. Для наводнений и селеопасности велика роль системы мониторинга. В противопаводковой 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 страховании.

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 км^3/год (менее 0,3% общего объема водопотрсбления).

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 состоянии 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 обусловливают 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. км^3/год. В озерах сосредоточено 26,5 тыс. км^3 пресных вод, в том числе в оз. Байкал – 23 тыс. км^3. Эксплуатационные запасы подземных вод составляет 30,4 км^3/год (по прогнозным оценкам – 323,4 км^3/год); в настоящее время используется 11–13 км^э/год. Забор воды из водных объектов постоянно снижается, в 1985 г. он составил 117,3 км^3, в 2001 – 87,4 км^3. В экономике страны в 2000 г. было использовано всего 214,6 км^3 воды, из них 87,4 км^5 – в оборотных и 127,2 км^3 – 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 водопотреблении 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, обеспечивающею 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. но проблемам экологическою 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 уровни Каспийского мори и его эколого-экономические последствия // Тез. докладов Междунар. науч. семинара. – М., 2000.

Эйнор Леонард Ольгердович

(02.04. 1932 – 22.05. 1995)

Леонард Ольгердович Эйнор – 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. Эйнор родился 2 апреля 1932 г. в г. Ленинграде, в семье крупного геолога Ольгерда Леонардовича Эйнора – автора широко известного двухтомного учебника для ВУЗов «Основы геологии СССР». Детство и юность Л.О. Эйнор 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., Ейнор Л.О. «Життя зеленого».

В середине 1973 г. Л.О. Эйнор по семейным обстоятельствам переезжает в Москву. Он работает в Госкомитете по науке и техники 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. Эйнор 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. Эйнор и его коллеги проводили как лабораторные, так и полевые работы на базе Иваньковской 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 «гидроботанические 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. Эйнор 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. Эйнор защитил в 1989 г. в МГУ им. М.В. Ломоносова, а также в опубликованной в 1992 г. монографии «Макрофиты в экологии водоёма».

Л.О. Эйнор 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. Эйнор предложил вместо сплошной дамбы построить несколько рядов высоких стрелообразных сооружений с вершинами, обращенными вверх по течению. Такая конструкция позволяла невской воде беспрепятственно уходить в Финский залив, но из-за образующихся водоворотов перекрывала обратный ход воды.

В 1989 г. Л.О. Эйнор 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. Эйнор 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 вод[1]

Л.О. Эйнор

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] Эйнор 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 водоохранных 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 Завидовс-

кая птицефабрика в Калининской обл. производительностью 1,5 млн голов птицы в год. Сброс вод с полей фильтрации после очистных сооружений составляет здесь ~2000 м^3/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 Иваньковского водохранилища, где распластанный 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 Иваньковского 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 рогоза и тростника и после обвалования участка

Показатель	В период существования болотистого участка		После обвалования участка и создания прямоточной 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	
02, % насыщения	10±7	95±5	15±10	254±10
БПК6, 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 па 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 м^2 камыша, тростника или рогоза должна составлять 2 м^3/(м^2·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 м^2, очевидно, завышено. К. Зайдель [29] допускала нагрузку 0,5 м^3/(м^2·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 м^3/(м^2·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 м^2 площади с гелофитами не должна превышать 0,2 м^3/(м^2·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 трудноразлагаемых органических веществ. При этом необходимы соответствующие условия для развития и закрепления на твердых субстратах медленнорастущих видов, способных к разложению до простых соединений типа CO_2, CH_4 и NH_2 трудноразлагаемых 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, pH, 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

$$4H_2+CO_2=CH_4+2H_2O(\Delta G=-139{,}2\ кДж/моль\ CH_4).$$

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 сим биотические 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 выносливые 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].

Затопленные 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%). Достигаемое 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/(м^2·сут) в сухом веществе, при этом содержание N можно принять за 1%, а удаление N в гряде – до 0,2 г/(м^2·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/(м^2·сут).

Величины выноса N и P за сезон с фитомассой тростника соответственно составляют 30 и 7,6 г в расчете на 1 м^2 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/(м^2·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 многоуровенную 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 $C_{вых}$ и выходе $C_{вх}$ ботанической площадки, измеряя ее длину l, ширину b, расход воды q и зная объем жидкости в ней ϖ, в соответствии с уравнением первого порядка

$$C_{вых}=C_{вх}e^{-K\frac{\varpi}{q}}$$

или в более удобной форме интегрального уравнения

$$\ln\frac{C_{вых}}{C_{вх}}=-K\frac{\varpi}{q}$$

Отсюда

$$K=\frac{q}{\varpi}\ln\frac{C_{вх}}{C_{вых}}$$

Сравнение констант K_1, K_2, …, 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 м^2, однако значительные затраты должны окупиться 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 обусловливает 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 выстлано гидромелиоративной пленкой с засыпкой сверху тонкого защитного слоя песка) на глубину 0,5–0,7 м химически инертного материала (типа разнокали-

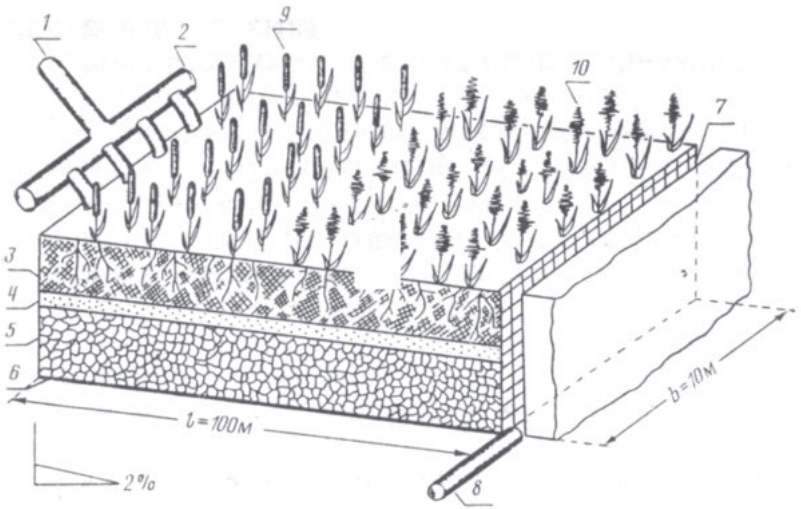


Рис. 1. Ботаническая площадка для доочистки сточных вод как биоинженерное сооружение
1 – входная труба; *2* – распределительная гребенка; *3* – корневищный грунт; *4* – песок; *5* – гравий или щебень; *6* – подложка; *7* – приемная траншея; *8* – выпускная труба; *9* – рогоз; *10* – тростник

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 гелофиты, 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 гелофиты по активности доочистки сточных вод, но плохо переносит перегрузки повышенными концентрациями загрязняющих веществ. Кроме того, число мест в Подмосковье, 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 Иваньковском 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 аира, 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 сколько-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., Эйнор Л.О. Регулирование зарастаемости мелководий водохранилищ гидроэлектростанций // Сб. науч. тр. Гидропроекта. 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., Телитченко 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. Оксиюк О.П., Стольберг Ф.В. Управление качеством воды в каналах. Киев: Наук, думка, 1986. 171 с.

13. Оксиюк 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. Эйнор 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 Wasserwirtschaftt. 1983. B. 35. №9–10. S. 213–225.

27. Hoffman K. Wachstumsverhalten von Schilf (Phragmites australis [Cav.l 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//BiologicaI 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 saccharaflorus to variying 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. Олонецкая, д. 17А, офис 104
Тел.: (495) 203-57-93
E-mail: kursizdat@gmail.com, http://www.kursizdat.ru