

Федеральное агентство научных организаций  
Институт водных проблем Российской академии наук

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ  
ИНСТИТУТА ВОДНЫХ  
ПРОБЛЕМ РАН

1967–2017

Том 2

Москва  
КУРС  
2017

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

**Избранные труды Института водных проблем РАН: 1967–2017: В 2-х т. –  
М.: КУРС, 2017. – Т. 2. – 720 с.**

ISBN 978-5-906923-74-5 (КУРС)  
ISBN 978-5-906923-76-9 (КУРС, общ.)

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

Представляет интерес для специалистов в области изучения и использования вод суши.

ISBN 978-5-906923-74-5 (КУРС)  
ISBN 978-5-906923-76-9 (КУРС, общ.)

© Коллектив авторов, 2017  
© Институт водных проблем РАН, 2017

# **СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Процессы гидрологического цикла суши</b>	
<i>Кучмент Л.С.</i> Развитие методов гидрологических прогнозов и смена их парадигмы.....	5
<i>Гусев Е.М., Насонова О.Н.</i> Проблемы изучения и моделирования взаимодействия поверхности суши с атмосферой .....	25
<i>Мотовилов Ю.Г.</i> Моделирование полей характеристик речного стока .....	47
<i>Гельфен А. Н.</i> Динамико-стохастические модели со случайными входами в приложении к задачам гидрологии речных бассейнов.....	71
<b>Гидродинамические, гидрофизические и гидрохимические процессы в водных объектах</b>	
<i>Дебольский В. К., Дебольская Е.И., Долгополова Е.Н., Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н.</i> Проблемы и современные исследования гидродинамики русловых потоков и ледотермики .....	101
<i>Зырянов В.Н.</i> Нелинейная волновая диффузия в геосредах: пампинг-эффект .....	125
<i>Бреховских В.Ф., Перекальский В.М., Волкова З.В., Брезгулов В.С., Вишневская Г.Н., Кременецкая Е.Р.</i> Исследование процессов переноса загрязняющих веществ в водных объектах: теория и эксперимент.....	162
<i>Вавилин В.А.</i> Кинетический изотопный эффект как следствие динамики химических и биологических процессов: образование метана и его аэробное и анаэробное окисление .....	192
<b>Проблемы гидрологии суши и технологии гидрологических исследований</b>	
<i>Добропольский С.Г.</i> Современное состояние и проблемы глобальной гидрологии .....	214
<i>Михайлова М.В., Михайлов В.Н.</i> Современное состояние и перспективы гидрологии устьев рек .....	252
<i>Музылев Е.Л., Курбатова</i> Использование данных дистанционного зондирования для гидрологических исследований в ИВП РАН: ретроспектива и современные достижения....	281
<i>Ферронский В.И.</i> Изотопная гидрология: пути развития и решаемые проблемы .....	313

<b>Статистическая гидрология</b>	
Болгов М.В. Развитие идей статистической гидрологии в ИВП РАН .	390
Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровней естественных озер: основные исследования ИВП РАН за 1967–2017 гг. ....	412
<b>Управление водными ресурсами, проблемы водопользования и оценки водообеспеченности</b>	
Данилов-Данильян В.И. Экономические проблемы управления водными ресурсами и водным хозяйством .....	429
Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Водопользование в условиях ..... неопределенности.....	454
Джамалов Р.Г Изучение и оценка подземного стока и ресурсов пресных подземных вод как основы их рационального использования и охраны. ....	487
Бухарицын П.И. Оценка современного состояния водообеспеченности района Западных подстепных ильменей .....	513
<b>Качество вод суши и гидроэкология</b>	
Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Сухоруков Б.Л., Бакаева Е.Н. Экологотоксикологические исследование и моделирование качества водных ресурсов юга России.....	539
Эльпинер Л.И. Развитие медико-экологических исследований водных проблем в ИВП РАН.....	565
Веницианов Е.В., Чиганова М.А., Аджиенко Г.В. Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод .....	606
Новикова Н.М., Кузьмина Ж.В. Изучение и оценка гидрогенной динамики экосистем .....	628
Джамалов Р.Г., Никаноров А.М., Решетняк О.С., Мягкова К.Г., Сафронова Т.И. Качество вод бассейна р. Оки и степень их загрязнения.....	671
Авторы статей.....	690

# **ПРОЦЕССЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА СУШИ**

## **Развитие методов гидрологических прогнозов и смена их парадигмы**

*Л.С. Кучмент*

Гидрологические прогнозы – один из наиболее важных разделов прикладной гидрологии, в котором разрабатываются методы предсказания возможных временных изменений количественных характеристик гидрологических процессов для повышения эффективности управления водноресурсными системами при их хозяйственном использовании и минимизации возможных ущербов, связанных с опасными гидрологическими явлениями,

В течение длительного времени методы прогнозирования представляли собой в основном простые уравнения регрессии, полученные графическим методом или с помощью статистического анализа имеющихся рядов гидрометеорологических измерений воздействий на речной водосбор и речного стока. Исключение составляли методы прогнозов водного режима, основанные на упрощённых моделях движения воды в речных руслах, при которых объём вычислений сравнительно невелик.

Возможности разработки методов гидрологических прогнозов радикально изменились в 1960-е гг., когда появились быстродействующие электронные вычислительные машины и проблема допустимого объёма вычислений начала исчезать. К этому времени накопились также значительные материалы экспериментальных исследований гидрологических процессов и достаточно длинные ряды гидрометеорологических наблюдений за формированием речного стока в различных физико-географических условиях, позволившие существенно уточнить представления о механизмах формирования стока, что создало видимость разработки для прогнозов стока сложных математических моделей, включающих описание различных гидрологических процессов. Совершенствование методов измерения пространственно-временных изменений гидрометеорологических воздействий на водосбор (радарные измерения интенсивности осадков, аэрокосмическая съёмка полей снегозапасов и влажности почвы, спутниковые методы измерения эвапотранспирации) и создания гео-

информационных систем способствовала разработке моделей формирования стока, позволяющих воспроизводить пространственную картину составляющих гидрологического цикла в речном бассейне (модели с распределёнными параметрами). Однако из-за недостатка метеорологических измерений и характеристик водосбора для практических расчётов и прогнозов чаще применяются модели стока, в которых метеорологические воздействия на водосбор и характеристики водосбора, а также использующиеся зависимости и параметры считаются осреднёнными по выбранным площадям и сосредоточенными в точке (такие модели называют моделями с сосредоточенными параметрами).

За время, прошедшее с момента появления в практике гидрологического прогнозирования компьютеров, были созданы десятки разнообразных моделей формирования стока, отличающихся использованием разных представлений о гидрологических процессах и пространственно-временными масштабами воспроизведения гидрологических явлений.

Модели, которые в настоящее время для гидрологических прогнозов, можно разделить на три группых [1].

1) Модели, где гидрологическая система, в которой отсутствуют взаимодействия различных гидрологических процессов, рассматривается как «черный ящик» и априорная информация о структуре и параметрах гидрологической системы полностью игнорируется или используются лишь общие гипотезы о механизмах генезиса стока и идентификация гидрологической системы (определение структуры и параметров модели) производится путём подбора (калибровки) по данным наблюдений на её входе и выходе.

2) Модели, при построении которых используются упрощённые физические представления о взаимодействии различных гидрологических процессов и эмпирические зависимости, которые могут быть применены при определении структуры модели или её параметров (такие модели в гидрологии обычно называют концептуальными). В общем виде концептуальные модели представляют собой обычновенные дифференциальные уравнения. Большинство параметров концептуальных моделей нельзя находить путём измерений и их калибруют, причём число их при сложных условиях формирования стока может быть достаточно большим (18–20). Из-за ограни-

ченности данных, несовершенства моделей и взаимосвязей между параметрами модели небольшое увеличение числа параметров может создавать значительные трудности при калибровке параметров. Поэтому необходимо, чтобы число параметров было совместимым с надёжностью входных данных и требуемой точностью. В настоящее время применяются разнообразные методы автоматической и ручной калибровки параметров, которые значительно облегчают выбор оптимальных значений параметров, однако применение этих методов требует достаточно длинных рядов наблюдений и внимательной проверки качества калибровки по данным, неиспользовавшимся при калибровке.

3) Физико-математические модели, основанные на достаточно полных физических представлениях о процессах формирования стока, и параметры которых могут быть выражены через измеряемые или заданные априорно физические константы. В общем виде эти модели представляют собой уравнения в частных производных и позволяют учитывать пространственную изменчивость гидрологических процессов и параметров моделей.

Модели типа «чёрного ящика» с включением некоторых эмпирических зависимостей получили наибольшее распространение для прогнозов гидрографа стока в речных руслах. В частности, широко используются из-за простоты определения их параметров и сравнительно небольшого объёма необходимой исходной гидрометрической информации линейные модели с сосредоточенными параметрами, основанные на применении интеграла Дюамеля, единичного гидрографа, методов Маскингама, Калинина–Милюкова [1]. Во многих работах применяются нелинейные модели с сосредоточенными параметрами, используются нелинейные связи расходов воды на входе и выходе речных участков с объёмами воды на этих участках. Для сложных речных русел применяются модели, основанные на связи входного и выходного гидрографа в виде функционального ряда Вольтерры в квадратичном приближении [1]. В качестве примера такого подхода можно привести построение модели Нижней Волги, где нелинейное преобразование входного гидрографа разбивается на две последовательные операции: преобразование с помощью линейных систем, функции влияния, которых представляют собой нормированные функции Лагерра, и

нелинейное безынерционное преобразование. В итоге полученная связь входного и выходного гидрографов включает 7 параметров, которые находятся путём подбора.

Особой категорией моделей «чёрного ящика» являются искусственные нейронные сети [2]. Подобно мозгу, искусственные нейронные сети образуются путём соединения простых нелинейных систем (нейронов), связь входа и выхода которых можно представить в виде сигмоиды или гиперболического тангенса. Соединённые между собой нейтроны, образуют скрытую сеть с произвольным расположением нейронов в различных слоях и различными межслойными соединениями. В процессе обучения с помощью проб и ошибок по данным наблюдений на входе и выходе всей сети определяется число скрытых нейронов в сети, их расположение и параметры описывающих их зависимостей. Выбор структуры модели «чёрного ящика» значительно упрощается и калибровка модели становится более надёжной, если при этом удается хотя бы частично использовать физические соображения и представления о моделируемых процессах. Ряд работ по применению искусственных нейронных сетей для моделирования гидрологических систем показывает, что с помощью этого метода удается добиться высокой точности воспроизведения выходных переменных, однако при этом надёжность и точность прогнозов может быть низкой, т.к. физическая структура реальной гидрологической системы может значительно отличаться от той, которая находится методом проб и ошибок.

Наибольшее применение в краткосрочных гидрологических прогнозах речного стока получили концептуальные модели. При разработке методов краткосрочных прогнозов обычно имеются достаточно длинные ряды наблюдений, что обеспечивает достаточную точность для определения параметров концептуальных моделей. Использование концептуальных моделей формирования стока и систем, обеспечивающих эти модели текущей гидрометеорологической информацией и метеорологическими прогнозами в автоматическом режиме, способствовали внедрению в оперативную практику систем гидрологического прогнозирования, с помощью которых можно выпускать непрерывные прогнозы стока различной заблаговременности по всем основным створам информационной

сети речных систем. Так, например, в США непрерывные ежедневные прогнозы речного стока выпускаются по данным гидрометеорологическим наблюдений и метеорологических прогнозов по более, чем по 4000 створов. Плотная информационная сеть пунктов, для которых выпускаются ежедневные гидрологические прогнозы, охватывает и территорию Европейского Союза. Постоянно ведутся работы по повышению точности и надёжности гидрологического прогнозирования путем улучшения качества используемых моделей формирования стока и привлечения дополнительной исходной информации.

Физико-математические модели формирования речного стока разрабатываются на основе физико-математических описаний гидрологических процессов и использования материалов лабораторных и полевых экспериментальных исследований, что позволяет с достаточной полнотой воспроизводить сложные механизмы формирования стока и связанного с ним широкого круга гидрологических явлений. Из таких механизмов особо следует выделить процессы в мёрзлых грунтах, впитывание талой воды в мёрзлую почву, образование в почве запирающих слоёв вследствие наличия в ней переохлажденной жидкой воды. От величины накопления твёрдых осадков, физических свойств снега и погодных условий зависит интенсивность поступления воды на водосбор в период снеготаяния. Плотность свежевыпавшего снега определяется главным образом метеорологическими условиями в момент выпадения осадков. С течением времени снег уплотняется и оседает под действием собственного веса. Наряду с механическим уплотнением происходит преобразование ледяных кристаллов и структуры снега. Для прогнозов дождевого стока важное значение имеет описание вертикального переноса почвенной влаги с учётом взаимодействия стока с растительным покровом. Однако возможности практического применения этих моделей для гидрологических прогнозов оказались весьма ограниченными, т.к. качество моделирования стока зависит не только от полноты и детальности математического описания физических процессов, но и от наличия измерений характеристик речных бассейнов, в которых эти процессы происходят. Входящие в модели коэффициенты (параметры) должны быть согласованы по физическому смыслу и пространственно-временным

масштабам с выбранной схематизацией описываемых физических процессов. Часть параметров моделей формирования стока удаётся определить по априорной информации или по данным прямых измерений характеристик водосбора, но большинство параметров приходится калибровать. Чем сложней структура выбранной модели, тем более трудной и неопределённой становится задача калибровки параметров и увеличиваются требования к объёму и качеству исходной экспериментальной информации. При недостаточной обеспеченности экспериментальной информацией уточнение математического описания физических процессов, происходящих в речном бассейне, может приводить к снижению точности определения параметров и в итоге снижения точности всей модели. В то же время можно предположить, что детальные модели формирования речного стока могут обладать значительной избыточностью в воспроизведении гидрологических процессов для многих практических задач, и эта избыточность может приводить к уменьшению возможной достигаемой точности интересующих потребителя величин. Важным преимуществом физико-математических моделей является увеличение возможностей усвоения различных видов гидрометеорологической информации по сравнению с концептуальными моделями. Всё это делает весьма естественной гипотезу, что физико-математические модели формирования стока при их должном обеспечении экспериментальной информацией могут существенно расширить области воспроизведения возможных гидрологических явлений и давать большую точность, чем модели с сосредоточенными параметрами. Однако в современных условиях необходимое для развитых физико-математические модели формирования стока обеспечение информацией встречается достаточно редко и при решении массовых практических задач приходится использовать ограниченную экспериментальную информацию. В то же время во многих случаях оказывается возможным осуществить такой выбор модели или её упрощения, при котором оказывается возможным удовлетворить требования к точности расчёта интересующих потребителя величин. Модели формирования речного стока с распределенными параметрами значительно расширяют возможности использования информации о пространственных изменениях характеристик речного стока бассейна и метеорологии.

ческих воздействиях на водосбор. Это даёт возможность получать качественную картину пространственных изменений составляющих водного баланса внутри водосбора (то, что не дают модели с сосредоточенными параметрами). Однако для получения достаточной точности расчёта стока в замыкающем створе речного водосбора необходима, как правило, калибровка значительно большего количества параметров, чем при использовании моделей с сосредоточенными параметрами. Национальная служба погоды США организовала в 2002 г. обширный международный проект по сравнению возможностей использования моделей стока с сосредоточенными и распределёнными параметрами для краткосрочных гидрологических прогнозов. В первой фазе этого проекта расчёты гидрографа в замыкающем створе речных бассейнов полученные с помощью модели с сосредоточенными параметрами, используемой для прогнозов на всей территории США, сравнивались с расчётами для нескольких водосборов, расположенных в Оклахоме, по 12 моделям с распределёнными параметрами, разработанными в разных странах. Результаты сравнения рассчитанных в замыкающих створах гидрографов неожиданно показали, что концептуальная модель НСП США дала заметно большую точность, чем модели с распределёнными параметрами. В среднем модели с распределёнными параметрами дали улучшение точности расчёта объёмов стока лишь в 14% расчётных гидрографов, улучшение точности расчёта максимального расхода в 33% и времени наступления пика гидрографов в 22%. В связи с этим НСП США приняла решение провести вторую фазу проекта на большом числе водосборов и с более качественными данными наблюдений. В новых экспериментах участвовали 16 моделей с распределёнными параметрами и 2 модели с сосредоточенными параметрами. Использования проводились по данным наблюдений на 16 равнинных водосборах, расположенных в Оклахоме, и на 2 горных водосборах, расположенных в Сьерра-Неваде. Результаты этих экспериментов оказались близкими к тем, которые были получены в первой фазе проекта. Модели с распределёнными параметрами дали улучшение расчётов объёма стока лишь для 18% гидрографов для равнинных рек, максимального расхода для 24% и времени наступления пика для 28%. Для горных рек получено соответственно – 24%, 12%, 41%.

В последние десятилетия точность и надёжность гидрологических прогнозов, а также плотность пунктов, для которых они выпускаются значительно возросли. Внедрение в оперативную практику моделей формирования стока и увеличение объёма гидрометеорологической информации способствовали разработке автоматизированных систем гидрологического прогнозирования, предназначенных для выпуска непрерывных прогнозов на различные сроки. В то же время необходимость увеличения безопасности гидротехнических сооружений, расширения экологических требований, повышения эффективности использования водноресурсных систем требуют всё более полного и осторожного использования гидрологических прогнозов с учётом имеющихся неопределённостей в исходных данных и возможных ошибок в методиках гидрологических прогнозов.

Исследования по разработке методов оценки возможных неопределённостей и ошибок в гидрологических прогнозах, а также стремительный рост вычислительных мощностей, лучшее понимание физики и динамики гидрологических систем и увеличивающаяся доступность гидрологических наблюдений привели к качественному изменению парадигмы гидрологического прогнозирования: в настоящее время в развитых странах начал осуществляться переход от детерминированных (однозначных) прогнозов к вероятностному прогнозированию, позволяющему предсказывать не только наиболее вероятные значения прогнозируемых величин, но и оценивать вероятности экстремальных и редких событий [4, 5].

Основными источниками неопределённости в гидрологическом прогнозировании являются ошибки в метеорологических прогнозах и измерениях, используемых в качестве входной информации, и неопределённость, связанная с гидрологическими расчётами (пространственно-временные ошибки в задании начальных условий, неопределённость в выборе структуры моделей и калибровке их параметров, ошибки измерений на выходе гидрологической системы). Возможности общей оценки неопределённости прогноза зависят от сложности используемой гидрологической модели и исходной информации. В общем виде решение этой задачи может быть получено аналитическими методами или методом Монте-Карло путём замены динамической модели динамико-стохастической с использованием вероятностных распределений параметров и вход-

ных данных. В [3] предложен общий формальный байесовский подход к анализу неопределённостей, который позволяет раздельно учесть неопределённость, обусловленную входными данными и ошибками модели. Однако возможности аналитических методов весьма ограничены, а использование метода Монте-Карло для учёта нескольких источников неопределённости из-за «проклятия размерности» может приводить к огромным, а иногда и нереальным затратам машинного времени. В связи с этим во многих работах делаются попытки объединить источники неопределённости различного происхождения эмпирическим путём, используя имеющиеся измерения метеорологических и гидрологических величин. При определении возможной заблаговременности прогноза и оценки риска его использования важно выбрать соответствующие показатели качества прогнозов. В отличие от обычно принятых оценок детерминистических прогнозов, где основным критерием эффективности прогнозов является отклонение прогнозируемых величин от априорно задаваемых (например, климатической нормой или инерционно задаваемых величин), качество вероятностных прогнозов оценивают по некоторым показателям с учётом требований потребителя прогнозов. При выборе этих показателей, которые могут использоваться в виде численных критериев, диаграмм или гистограмм, стремятся обеспечить надёжность прогнозов (близость вероятностного прогноза к средней частоте прогнозируемого события, определённой по данным наблюдений за период верификации прогнозов), отчётливость (возможность оценивать вероятность событий, вероятность которых близка к 0 или 1) и, наконец, разрешающую способность (способность отличить относительную частоту появления прогнозируемого события при прогнозах от относительной частоты его появления по данным наблюдений за период верификации) []. Учитывая сложность пространственной картины развития гидрологических процессов в речной системе и недостаточную точность метеорологических прогнозов, вместо прогнозирования расходов воды как непрерывных величин часто ограничиваются прогнозированием бинарного события: превысит или не превысит расход воды заданную критическую величину (заданный порог). Для количественной оценки эффективности вероятностных прогнозов чаще всего используются два критерия, основанные на

сопоставлении безусловных интегральных распределений прогнозируемых и фактических величин стока [6, 7]:

1. Среднее отклонение прогнозируемых и фактических интегральных распределений вероятности

$$EM = \mu_f - \mu_o,$$

где  $\mu_o$  и  $\mu_f$  – безусловные средние значения интегральных вероятностей фактических и спрогнозированных величин стока в заданном интервале его изменений, соответственно.

Этот критерий позволяет выявить наличие систематических погрешностей прогноза.

2. Относительная среднеквадратическая погрешность прогноза интегральных вероятностей (Ranked Probability Skill Score)

$$RPSS = 1 - \frac{RPS}{RPS^*},$$

где  $RPS$  – сумма квадратов отклонений прогнозируемых и фактических интегральных распределений вероятности, равная

$$RPS = (\mu_f - \mu_o)^2 + (\sigma_f - \sigma_o)^2 + 2(1 - \rho_{fo})\sigma_f \sigma_o,$$

$\sigma_o$  и  $\sigma_f$  – среднеквадратические отклонения интегральных вероятностей фактических и спрогнозированных величин стока, соответственно;  $\rho_{fo}$  – коэффициент корреляции между интегральными вероятностями фактических и спрогнозированных величин стока;  $RPS^*$  – погрешность климатического прогноза (по фактическому ряду значений стока, без использования модели). Критерий  $RPSS$  позволяет оценить степень уменьшения природной неопределенности процесса, достигаемого с помощью прогноза.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке методов вероятностных прогнозов и учёта их неопределенности оказалось так называемое ансамблевое прогнозирование, при котором прогнозы представляют собой ансамбли прогнозируемых величин, полученных путём моделирования гидрологических процессов при задании исходной информации в виде ансамблей входных данных или различных сценариев неопределённостей, содержащихся в исходных данных (ошибки модели, ошибки в начальных условиях и входах, ошибки параметров гидрологических моделей, и т.д.).

Разработка методов ансамблевых гидрологических прогнозов началась с исследования возможностей использования для гидрологического прогнозирования ансамблевых прогнозов погоды. Чис-

ленные решения гидродинамических уравнений погоды являются неустойчивыми и весьма чувствительными к изменениям начальных условий, методам описания подсеточных процессов, выбору численных схем и пространственно-временных шагов. Мелкомасштабные ошибки в задании исходных полей элементов погоды могут неограниченно возрастать во времени, искажая предвычисляемую динамику крупномасштабных метеорологических процессов. Это приводит к тому, что прогнозы погоды заблаговременностью более двух суток в зависимости от способов задания начальных условий, используемой модели погоды или способов решения гидродинамических уравнений могут существенно отличаться. Развитие вычислительной техники и появление суперкомпьютеров создало возможности для многократного выпуска прогнозов погоды по одной исходной информации, но при разных способах учёта начальных условий или с помощью различных прогностических схем. В результате прогноз погоды представляется на интервале прогнозирования в виде ансамбля («спагетти») 20–50 численных решений уравнений погоды, что даёт возможность определить возможный разброс прогнозируемых величин.

Разработка методов ансамблевых гидрологических прогнозов началась с исследования возможностей использования ансамблевых прогнозов погоды для гидрологического прогнозирования. В дальнейшем оказалось, что подходы, использованные для ансамблевого прогнозирования погоды, являются весьма продуктивными и для гидрологических прогнозов, где ансамблевые метеорологические прогнозы не используются. Привычные для современного пользователя детерминистические (однозначные) гидрологические прогнозы позволяют определять лишь математическое ожидание прогнозируемой величины, игнорируя информацию об её менее вероятных значениях. Однако для выбора оптимальных решений при управлении водными ресурсами важна также информация о различных квантилях прогнозируемых величин и оценка вероятности редких катастрофических явлений. Поэтому при разработке методов гидрологических прогнозов желательно обеспечить успешность прогнозирования не только математического ожидания, но и различных квантилей прогнозируемых величин. Представление гидрологических прогнозов в виде ансамблей прогнозируемых величин

или их вероятностных распределений при соответствующем выборе критериев качества прогнозов позволяет существенно расширить используемую информацию и облегчить выбор оптимального горизонта прогнозирования. На примере конкретных водноресурсных систем показано, что использование ансамблевых прогнозов стока обеспечивает большую экономическую эффективность, чем детерминистические прогнозы [8]. Ансамблевые прогнозы, однако, не могут учесть все возможные факторы неопределенности, и необходимо выявлять наиболее важные неопределенности для различных процессов формирования стока и гидрологических моделей, а также для различных прогнозных горизонтов и доступных гидрометеорологических наблюдений. В ряде работ показано, что ансамблевые гидрологические прогнозы вместе с увеличением выпускаемой информации о развитии гидрологических явлений обеспечивают и более высокую заблаговременность прогнозов

Исследования по разработке методов краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов и определения их возможной заблаговременности проводились в многочисленных гидрологических прогностических центрах. В работах [3, 4], представлены результаты 38 таких исследований. Эти исследования показывают возможный горизонт таких прогнозов, надёжность определяется качеством прогнозов погоды и размерами водосбора. Многие центры прогнозирования наводнений в разных частях мира ограничиваются сейчас ансамблевым прогнозированием только на основе ансамблевых краткосрочных метеорологических прогнозов. В Национальной службе погоды (НСП) США проведена работа по разработке и верификации методов ансамблевых гидрологических прогнозов с использованием выпускаемых НСП ансамблевых прогнозов температуры и осадков и ведутся работы по организации службы ансамблевых гидрологических прогнозов во всех речных прогностических центрах США. Многочисленные исследования по разработке методов краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов и оценке их возможной заблаговременности проводились и для европейских рек. С 2003 г. под эгидой Европейской Комиссии ЕС разрабатывается система оповещения о наводнениях для всей Европы с использованием ансамблевых прогнозов погоды Европейского центра прогнозов на средние сроки.

В ряде работ исследовались возможности применения методов ансамблевого прогнозирования для долгосрочных прогнозов объёма речного стока с заблаговременностью от нескольких недель до нескольких месяцев). Первые работы в этой области были выполнены на примере двух горных речных бассейнов США. С помощью концептуальных моделей формирования стока с сосредоточенными параметрами по имеющимся метеорологическим наблюдениям рассчитывались показатели состояния водосбора к моменту выпуска прогноза, и затем по ансамблям погод за период заблаговременности прогноза, наблюдавшихся в предыдущие годы, рассчитывались возможные ансамбли гидрографов стока и вероятностные распределения прогнозируемого объёма стока. Такой подход обеспечил эффективный вероятностный прогноз объёма стока с заблаговременностью до месяца.

Для физико-географических условий РФ наибольшее значение имеют долгосрочные гидрологические прогнозы весеннего стока крупных равнинных рек, где заблаговременность прогноза может достигать 2–3 месяцев. В настоящее время такие прогнозы выпускаются в детерминистической форме на основе регрессионных связей объёма стока с запасами воды в снеге и индикаторами состояния почвогрунтов перед снеготаянием при предположении, что метеорологические условия за период заблаговременности прогноза близки к климатической норме. Использование этих прогнозов для пропуска весеннего половодья нередко приводит к значительным экономическим и экологическим ущербам, т. к. точность регрессионных связей в отдельные годы оказывается очень низкой.

В ИВП РАН проведены исследования возможностей повышения качества долгосрочных прогнозов весеннего стока с помощью физико-математических моделей формирования стока с распределёнными параметрами, включающих описание динамики переноса тепла и влаги в зимний и осенний период. Эти исследования показали, что использования таких моделей позволяет существенно улучшить точность и надёжность детерминистических расчётов весеннего стока по сравнению с расчётами на основе регрессионных связей. Далее разрабатывалась методика долгосрочных (с заблаговременностью 2–3 месяца) ансамблевых прогнозов объёмов и максимальных расходов весеннего стока, основанная на использовании физи-

ко-математической модели формирования стока и ансамблевого моделирования входных данных. Долгосрочные метеорологические прогнозы с заблаговременностью 2–3 месяца не выпускаются, однако в большинстве случаев объём весеннего стока определяется начальными условиями перед снеготаянием. Неопределенность, которую вносит отсутствие метеорологических данных за период заблаговременности прогноза, восполнялась ансамблями входных данных, состоящих из исторических суточных температур, осадков и влажности воздуха наблюдений за предыдущие годы, или ансамблями, полученными путём моделирования методом Монте-Карло из этих временных рядов.

С помощью физико-математических моделей формирования стока по имеющимся до момента выпуска прогнозов метеорологическим наблюдениям определялись показатели состояния водосбора прогноза и затем, по ансамблям погод, наблюдавшихся в предыдущие годы, рассчитывались возможные ансамбли гидрографов стока и вероятностные распределения прогнозируемого объёма стока. Однако наблюдавшиеся за период заблаговременности метеорологические ряды далеко не исчерпывают возможных сценариев погоды за этот период. Важно учесть не только наблюдавшиеся, но и возможные сценарии метеорологических воздействий на речной водосбор. Такие сценарии можно получить за счёт использования возможностей физико-математических моделей формирования стока в сочетании со стохастическими генераторами погоды и метода Монте-Карло. Помимо учёта неопределенности в задании метеорологических условий за период заблаговременности, в этом случае можно также оценивать неопределенность прогнозов, обусловленную различным пространственным распределением метеорологических величин и использованием разных предикторов и начальных условий.

В Институте водных проблем РАН проведены исследования возможностей применения различных методов ансамблевых прогнозов для долгосрочного прогнозирования весеннего стока на примере рек Сосна, Сейм и водосбора Чебоксарского водохранилища. Сравнены разные методы построения ансамблей метеорологических данных, улучшение статистических оценок оправдываемости прогнозов в сравнении с прогнозами, полученными с помощью рег-

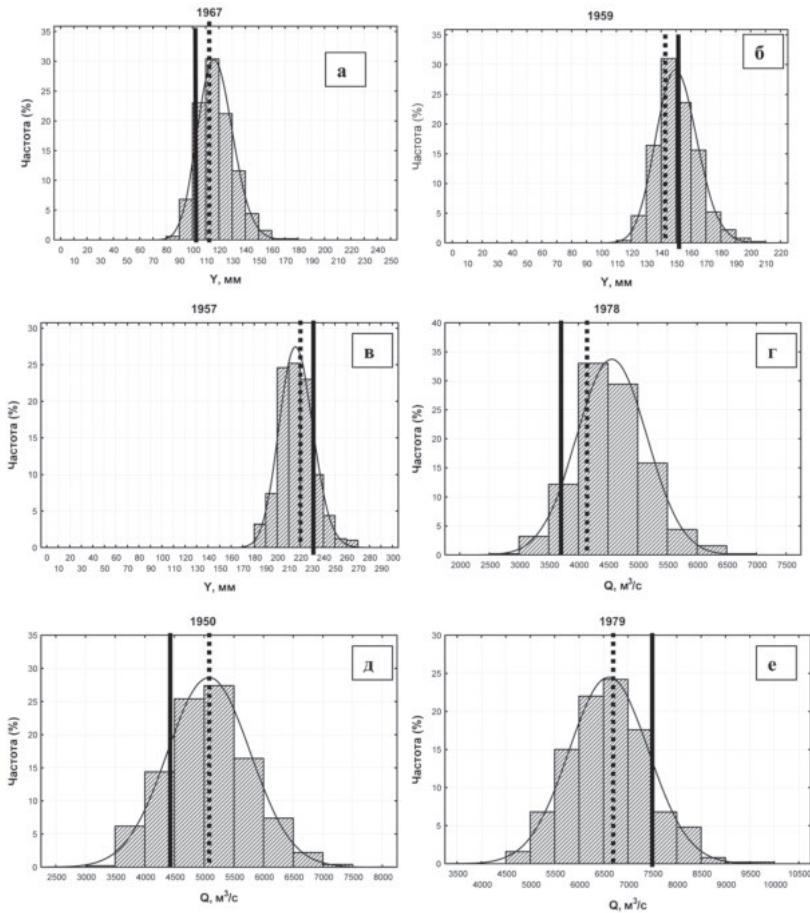


Рис. 1

рессионного отношения, разбросы «спагетти», необходимые длины статистических испытаний [9–13].

Общий вид вероятностного прогноза объёма стока весеннего половодья представлен на рис. 1.

Успешность краткосрочных гидрологических прогнозов в значительной степени зависит от точности задания начальных величин, которые характеризуют запасы воды в речном бассейне. Измерения этих величин, за исключением расходов воды, как правило, отсутствуют, и их обычно рассчитывают, начиная расчёты по прогности-

ческой модели за довольно длительное время до момента выпуска прогноза. При этом может происходить значительное накопление ошибок в характеристиках состояния гидрологической системы. При ансамблевых прогнозах появляется возможность уточнения начальных условий по мере поступления новой информации до момента выпуска прогноза. Уменьшение неопределённости исходной информации и улучшения качества вероятностных ансамблевых прогнозов может быть достигнуто путём оптимального совместного учёта ошибок, обусловленных несовершенством моделей, с ошибками измерений состояния гидрологической системы. Эта процедура, которую называют ассилиацией данных наблюдений в модели, состоит из двух этапов: 1) количественной оценки ошибок гидрологической модели и измерений состояния гидрологической системы и 2) пошаговой корректировки характеристик состояния гидрологической модели с учётом соотношения ошибок модели и измерений гидрологической СИСТЕМЫ. Основные трудности ассилиации данных связаны с количественной оценкой неопределённостей, связанных с различными процессами формирования стока и разными гидрологическими моделями, а также подбором стохастических моделей для описания и моделирования этих неопределённостей. Однако общие подходы для таких оценок недостаточно разработаны и в основном для этого используются эмпирические методы, выбор которых зависит от выбранной прогностической модели. Количественная оценка неопределённости значительно упрощается, если используются упрощённые физически обоснованные гидрологические модели, в которых параметры модели имеют ясный физический смысл.

Из различных процедур ассилиации данных в последние годы для гидрологических прогнозов стал чаще всего применяться ансамблевый фильтра Калмана [13, 14]. Разработка методики непрерывных ансамблевых краткосрочных прогнозов на основе ансамблевого фильтра Калмана проводилась нами с помощью физико-математической модели тало-дождевого стока р. Дон до г. Лиски [15, 16]. Использованная модель основана на конечно-элементной схематизации водосборной площади. В качестве характеристик состояния гидрологической системы для организации непрерывных ансамблевых краткосрочных прогнозов использовались запасы влаги и

льдистость верхнего метрового слоя почвы на лесных и полевых участках.

В выбранной версии ансамблевого фильтра Калмана для обновления характеристик состояния гидрологической системы реализуются два последовательных этапа для каждого члена ансамбля. На первом этапе выполняется предсказание состояния динамической системы на момент времени  $t$  по результатам расчётов по модели формирования стока

$$x_t = F(x_{t-1}, u_{t-1}, w_{t-1}), \quad (1)$$

где  $x_{t-1}$  – вектор состояния системы в момент времени  $t-1$ ,  $u_{t-1}$  – вектор внешнего воздействия (осадки, температура и влажность воздуха),  $w_{t-1}$  – ошибка модели и источники неопределённости,  $F$  – система уравнений модели, определяющая переход состояния системы от момента времени  $t-1$  к  $t$ .

По результатам расчётов всех  $N$  ансамблей строится ковариационная матрица ошибок  $P_t$

$$P_t = \frac{1}{N-1} E_t E_t^T, \quad (2)$$

где

$$E_t = (x_t^1 - \bar{x}_t, x_t^2 - \bar{x}_t, \dots, x_t^N - \bar{x}_t), \quad (3)$$

$$\bar{x}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_t^i, \quad (4)$$

$$x_t = (x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^N). \quad (5)$$

На втором этапе осуществляется корректировка полученных результатов по предварительной оценке характеристик состояния системы. Коэффициент корректировки Калмана  $K_t$  находится как

$$K_t = P_t H_t^T (H_t P_t H_t^T + R_t)^{-1}, \quad (6)$$

где величина  $P_t H_t^T$  аппроксимируется ковариацией между характеристиками состояния системы и прогнозируемыми расходами [5]

$$P_t H_t^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_t^i - \bar{x}_t) (H(x_t^i) - \bar{H}(x_t))^T, \quad (7)$$

а величина  $H_t P_t H_t^T$  аппроксимируется ковариацией прогнозируемых расходов

$$H_t P_t H_t^T = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H(x_t^i) - \bar{H}(x_t)) (H(x_t^i) - \bar{H}(x_t))^T, \quad (8)$$

где

$$\bar{H}(x_t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(x_t^i). \quad (9)$$

Матрица характеристик состояния системы  $X_t^+$  обновляется на каждом временном шаге в виде

$$X_t^+ = X_t + K_t(Q_t^i - H(x_t^i)), \quad (10)$$

где  $Q_t^i$  – измеренные расходы воды на момент времени  $t$ . В классическом ансамблевом методе фильтра Калмана измеренные расходы также подвергаются пертурбации для представления неопределённости.

Средние значения запасов влаги и льдистости на лесных и полевых участках задавались по результатам предварительных расчётов на модели формирования стока, до момента начала выпуска непрерывных прогнозов стока в выходном створе. Начальные значения характеристик состояния представлялись в виде ансамбля, использующего нормальные распределения характеристик состояния с нулевым средним и средней квадратической ошибкой равной доле (в процентах) от средней величины.

Ошибки в рассчитанных величинах поступлений талых и дождевых вод и измерениях расходов воды предполагались распределёнными по нормальному закону с нулевым средним и средней квадратической ошибкой, равной заданной доле, рассчитанной по модели величины поступления и от измеренного расхода.

Средняя квадратическая ошибка рассчитанного поступления талых и дождевых вод на водосбор изменялась от 10 до 40% от нормы. Ошибки измерения расходов воды в створе р. Дон у г. Лиски принимались равными от 10 до 30% средней величины. Характеристики состояния гидрологической системы на начало расчёта половодья менялись от 3 до 10% нормы. Ошибки в поступлении талых и дождевых вод и ошибки в измерениях расходов воды в выходном створе моделировались методом Монте – Карло .

Эффективность прогнозов оценивалась близостью спрогнозированных расходов воды с данными измерений расходов воды р. Дон у г. Лиски. В качестве иллюстрации проведённых расчётов на рис. 2 показаны результаты прогнозов расходов воды р. Дон у г. Лиски с заблаговременностью 4 суток с использованием обновлённых данных о характеристиках состояния гидрологической системы на каждый день выпуска прогноза. Затемнённая область на графиках представляет «спагетти» прогнозов, полученное за счёт включения неопределённостей во внешнем воздействии и ошибок в измеренных

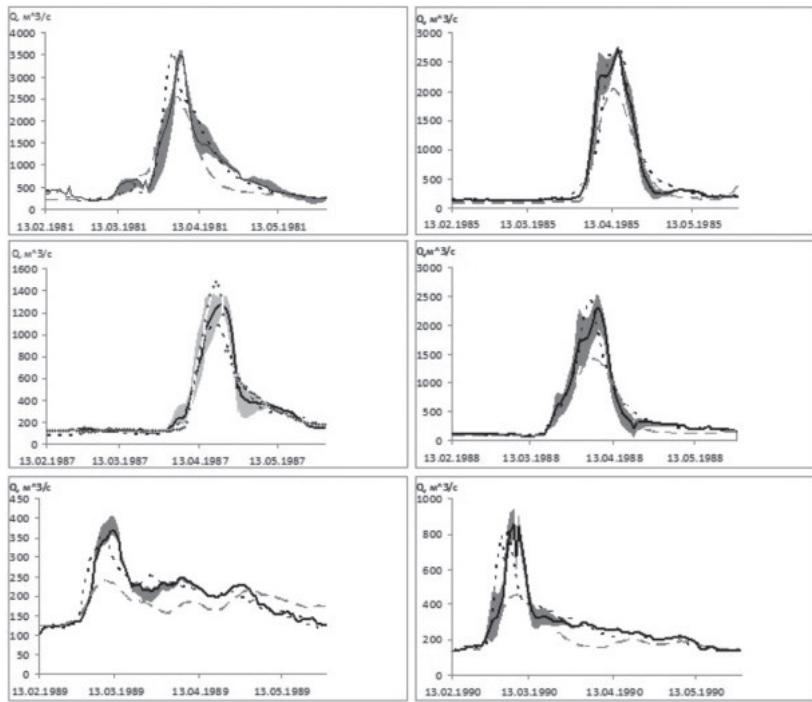


Рис. 2

расходах при использовании ассилияции измеренных расходов воды методом ансамблевого фильтра Калмана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление) (2008) Москва, Изд. ИВП РАН., 394 р.
2. Dawson and. Wilby2 Hydrological modelling using artificial neural networks. Progress in Physical Geography 25,1 (2001) pp. 80–108 C.
3. Krzysztofowicz R. Bayesian system for probabilistic river stage forecasting // J. of Hydrol. 2002. 268 (1–4). P. 16–40.
4. Cloke, H.L., Pappenberger, F., 2009. Ensemble flood forecasting: A review. J. Hydrol. doi:10.1016.
5. Schaake J.C, Hamill T.M, Buizza R, Clark M. HEPEX: the Hydrological Ensemble Prediction Experiment. Bulletin of the American Meteorological Society 88(10): 2008. P. 1541–1547.
6. Renner M., Werner M.G.F., Rademacher S., Sprokkereef E. Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine. Journal of Hydrology, 2009. V. 376. P. 463–475.

7. Boulin, E., Vannitsem, S., Skill of medium-range hydrological ensemble predictions. *Journal of Hydrometeorology*, 2005. V. 6 (5), P. 729–744.
8. Boucher M.-A., F. Anctil1, L. Perreault, and D. Tremblay. 2011 A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context. *Advances in Geosciences*. 29, 85–94.
9. Кучмент Л.С. Методические основы ансамблевых гидрологических прогнозов Водное хозяйство России №3, 2014. с. 5–16.
10. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. 2007. №2. С. 83–95.
11. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока. // Метеорология и гидрология. 2008. №12. С. 81–94.
12. Gelfan, A. N., Motovilov, Yu. G., and Moreido, V. M.: Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir, Proc. IAHS, 369, P. 115–120, doi:10.5194/piahs-369-115-2015, 2015.
13. Rakovec, O., Weerts, A.H., Hazenberg, P., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., 2012. Stateupdating of a distributed hydrological model with ensemble Kalman filtering: effects of updating frequency and observation network density on forecast accuracy. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (9), 3435–3449.
14. Liu Y. et al. Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3863–3887, 2012, 3863–3887
15. Демидов В.Н. Физико-математическая модель формирования талого стока равнинной реки (на примере р. Дон). Сб. научных трудов «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» Петрозаводск, 2015, с. 134–142
16. Kuchment L.S., Demidov V.N. The new paradigm in hydrological forecasting (ensemble predictions and their improving based on assimilation of observation data). Труды Международной научно-практической конференции «Водный форум БРИКС», Москва, 2016

# **Проблемы изучения и моделирования взаимодействия поверхности суши с атмосферой**

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ: гранты №14-17-00700  
(общий обзор LSM-моделей) и №16-17-10039 (обзор результатов,  
полученных на основе LSM-модели SWAP)

*E.M. Гусев, О.Н. Насонова*

## **Введение**

В соответствии с интенсивностью развития тех или иных областей научного знания, 18 в. иногда называют веком И. Ньютона, 19 в. – веком Ч. Дарвина, а 20 в. – веком В.И. Вернадского, разработавшего учение о биосфере – специфической оболочке планеты, организованной жизнью. Именно в 20 в. началось бурное развитие различных наук о биосфере Земли, продолжающееся и поныне. А громадный прогресс в области прикладной математики и вычислительных средств, развитие универсального для многих исследователей языка физико-математического моделирования привели к тому, что тезис Вернадского о единстве и взаимосвязи природы нашёл своё отражение во взаимосвязи и взаимопроникновении наук, приведшим к комплексному математическому описанию основных биосферных процессов. К последним следует отнести прежде всего глобальные циркуляции различных субстанций, формирующиеся под воздействием солнечной энергии. Возникновение на планете подобных циркуляций неизбежно, поскольку, согласно [19], при постоянном действии потока свободной энергии на ограниченную (по объёму и количеству вещества) систему, каковой можно считать и Землю, её единственной структуроформирующей реакцией может быть лишь организация собственного потока энергии, нейтрализующего на основе круговорота вещества внешнее энергетическое воздействие. Таким образом, поступающая на Землю энергия солнечного излучения приводит в движение все круговороты планеты, из которых наиболее интенсивными являются процессы атмосферной циркуляции, гидрологического цикла, а также «жизнь», которую, согласно Онсагеру и Моровицу [5], можно определить как «сопряжённую циркуляцию биоэлементов», поскольку жизнь в её современной форме не может существовать вне биотического круговорота.

При этом следует отметить, что на суше трансформация потоков солнечной радиации в другие формы энергии происходит в очень тонком планетарном слое, практически на границе между атмосферой и литосферой. Именно здесь сопрягаются все четыре составляющие биосфера: атмосфера, верхняя часть литосферы, гидросфера и живое вещество сушки. Толщина этого слоя, названного Вернадским «плёнкой жизни», очень незначительна: он не поднимается выше нескольких десятков метров над земной поверхностью и не опускается ниже её более, чем на несколько метров [1]. Однако, эта «плёнка жизни», или как её принято называть в климатологии, метеорологии и гидрологии, система «почва – растительный (и/или снежный) покров – приземный слой атмосферы» (в международной научной литературе для идентификации данной системы существует устоявшаяся аббревиатура SVAS (Soil – Vegetation – Atmosphere System), которую мы и будем использовать в последующем изложении), играет особую роль в формировании климатических, гидрологических и биотических процессов. Эта роль состоит в том, что SVAS является «точкой сопряжения» трёх упомянутых выше глобальных диссипативных структур: циркуляции атмосферы, гидрологического цикла сушки и круговорота биоэлементов наземных экосистем. При этом необходимо отметить два немаловажных обстоятельства. Во-первых, поскольку приводящая в движение эти структуры энергия солнечного излучения трансформируется в другие формы энергии в этой же «точке», то фактически именно здесь определяются и контролируются как интенсивность, так и характер временной динамики указанных диссипативных структур. Во-вторых, все три структуры взаимосвязаны и взаимозависимы. В силу этого все более возрастает потребность комплексного изучения и адекватного описания «физики» процессов тепло- и влагообмена, происходящих в SVAS.

Конечной формой систематизации научного знания об изучаемом объекте является его количественное описание, т.е. математическая модель. Качество решения указанной проблемы определяется, во-первых, качеством систематизации знаний, полученных в области гидрологии сушки, физики атмосферы, почвоведения, физиологии растений и т.п., в виде физико-математических моделей, воспроизводящих процессы взаимодействия сушки с атмосфе-

рой в региональном и глобальном масштабах, во-вторых, надёжностью информационного обеспечения этих моделей. К подобным моделям можно отнести получившие широкое распространение LSM-модели (Land Surface Models) [3, 8, 18].

### **Современное состояние в области изучения и моделирования процессов тепло- и влагообмена на основе LSM -моделей**

Рассмотренные выше обстоятельства привели к тому, что на современном этапе развития наук о Земле задачи понимания и математического моделирования физического (а зачастую и биофизического) механизма процессов, происходящих в SVAS, стали актуальными для целого ряда специалистов: климатологов, метеорологов, физиков атмосферы, гидрологов, почвоведов, геокриологов, физиологов растений, экологов, а также специалистов по сельскому и лесному хозяйству, формированию и управлению водными ресурсами и т.д. Усилия исследователей самого широкого профиля направлены на проверку и улучшение геофизических моделей, в частности LSM-моделей, на региональном и глобальном уровнях, а также на применение этих моделей для сценарного прогнозирования последствий возможных климатических изменений в разных регионах планеты.

Указанные задачи нашли свое отражение в организации целого ряда международных программ и проектов, связанных с комплексным исследованием и моделированием тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой, в частности, таких как Global Energy and Water cycle EXperiment (GEWEX), Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle (BAHC), Global Soil Wetness Project (GSWP), Global Land/Atmosphere System Study (GLASS), Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes (PILPS), Snow Model Intercomparison Project (SnowMIP), Rhone AGGregation experiment (Rhone-AGG), MOdel Parameters estimation EXperiment (MOPEX), African Monsoon Multi-disciplinary Analysis Land surface Model Intercomparison Project (ALMIP), Snow Model Intercomparison Project (SnowMIP), Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) и т.д., в постоянном включении в повестку международных конференций и симпозиумов, посвящённых самым разнообразным проблемам в области наук о Земле, тематики, связанной с LSMs. В проведении комплексных полевых экспериментов участвуют в

настоящее время обычно несколько десятков научно-исследовательских организаций самого разного профиля, осуществляющих как наземные, так и дистанционные измерения параметров системы SVAS и динамики её характеристик. Примером могут служить многочисленные международные и национальные крупномасштабные полевые эксперименты «Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment» (HAPEX-Sahel) в Сахели, First International land surface climatology Field Experiment (FIFE) в США, KURsk land-surface EXperiment (KUREX-89 и KUREX-91) в России, Southern Great Plains hydrology experiment (SGP97) в США и др. На основе международной кооперации создаются сети непрерывного специализированного мониторинга за характеристиками SVAS с высокой временной разрешающей способностью (FLUXNET, EURONET и др.).

Информация о различных характеристиках SVAS, накопленная международным научным сообществом, а также непрерывно получаемая в ходе выполнения текущих проектов и экспериментов, систематизируется в виде многочисленных электронных баз данных (например, комплексная база данных International Satellite Land-Surface Climatology Project (ISLSCP), Water and Global Change (WATCH), ECOCLIMAP), которые могут использоваться для задания значений параметров подстилающей поверхности в LSM-моделях.

Обычно перед исследователями, занимающимися разработкой LSM-моделей, возникают две большие задачи. Первая заключается в построении физически адекватной модели в локальном масштабе (на уровне небольшого достаточно однородного по параметрам и действующим внешним факторам участка суши). Вторая задача связана с переходом от модели локального масштаба к моделированию процессов в мезо- и макромасштабе (иногда такой переход называют регионализацией или апскейлингом), т.е. в масштабе достаточно протяжённой неоднородной территории суши (области, региона, речного бассейна, континента и т.п.).

Постановка этой задачи вызвана необходимостью иметь достаточно адекватное модельное воспроизведение физического механизма процессов, который наиболее просто изучать и моделировать на объектах малых масштабов в силу относительной однородности их параметров и влияющих факторов.

Постановка второй задачи обусловлена тем обстоятельством, что практически все основные биосферные объекты планеты являются продуктом самоорганизации биосфера под воздействием свободной энергии, порождающей диссипативные структуры, образование которых приводит к появлению в изначальном хаосе «островков упорядоченности», т.е. к значительной мозаичности природных объектов. В силу этого при увеличении масштабов исследуемого объекта неизбежно возникает целый ряд нерешённых задач, связанных с его неоднородностью и касающихся регионализации как самих процессов, происходящих в системе SVAS, так и параметров SVAS (геоморфологических, почвенных, растительного покрова), а также влияющих внешних факторов (например, осадков).

В методологических подходах к решению проблемы регионализации воспроизводимых LSM-моделями процессов, по-видимому, можно выделить три направления. Первое связано с применением к описанию процессов, происходящих в региональном масштабе, «точечных» (описывающих процессы на локальном уровне) физико-математических моделей. При этом средние по площади значения тех или иных выходных характеристик LSMs рассчитываются с использованием в моделях так называемых «эффективных» значений входных факторов и параметров системы [3].

Второе направление отличается учётом пространственной неоднородности объекта в явном виде. Оно предполагает представление рассматриваемого объекта в виде мозаичной совокупности однородных участков с различными, но детерминировано определёнными значениями соответствующих входных данных и получение совокупности решений для каждого участка [3].

Третье направление, статистическое, предполагает представление объекта в виде ансамбля участков, для которых входные характеристики являются случайными величинами с известными статистическими параметрами [3]. В этом случае задача сводится к аналитическому или численному решению уравнений, описывающих динамику не самих выходных характеристик, а их функций распределения или статистических моментов.

Можно отметить, что при описанной стратегии построения LSMs-моделей, последние представляют собой начальный, упрощённый этап в развитии моделей биосфера, которое начинается с

объектов относительно малых пространственных масштабов (типа биогеоценозов), но с достаточно большей детализацией процессов внутри LSMs, в отличие от моделей биогеохимических процессов, биogeографических или динамических глобальных моделей растительного покрова, также претендующих на подходы к описанию биосферы, но идущих к этому описанию как бы «сверху», т.е. с позиций объектов больших пространственных масштабов.

К настоящему времени можно считать, что физическая основа LSM-моделей достаточно хорошо параметризована, т.е. математическое описание геофизических, гидрологических и даже биофизических процессов алгоритмизировано достаточно адекватно. Тем не менее, одной из важнейших задач продолжает оставаться уточнение и повышение качества параметризаций указанных процессов, которое будет продолжаться и в дальнейшем, повышая при этом и качество самих LSM-моделей.

Поскольку число рассматриваемых в LSMs процессов велико, а варианты их параметризаций многообразны, количество существующих на сегодняшний день LSM моделей исчисляется десятками (если не сотнями). Поэтому дать полный обзор этих моделей в рамках одной статьи не представляется возможным. Отметим лишь, следуя классификации моделей, приведённой в [23], что они изменяются от схем типа «bucket» («ведро»), ориентированных на простоту описания и чаще всего игнорирующих растительность, до сложных микрометеорологических моделей, претендующих на максимальную детализацию объекта исследований и включающих множество параметров подстилающей поверхности, предназначенных для описания почвогрунтов, растительного и снежного покровов [9, 22]. Помимо этого существует большая группа так называемых промежуточных моделей, которые, занимая нишу между двумя вышеуказанными типами, пытаются найти разумный компромисс между адекватностью и простотой описания физических процессов (LAND [4], SPONSOR [6], ISBA [21], CLASS [25], ECMWF [17], SWAP [3, 13, 14] и др.).

Ещё одной важнейшей задачей является информационное обеспечение моделей, которое можно разделить на две части. Первая связана с идентификацией рассматриваемого объекта (речного бассейна, водосбора, полевой или лесной площадки, региона и т.д.),

обеспечиваемой заданием параметров его подстилающей поверхности (характеристик растительного покрова, параметров почвы, геоморфологических показателей, характеристик речной сети и т.д.), т.е. достаточно консервативных параметров, определяющих указанный объект. Параметры почвы и растительности могут быть либо измерены непосредственно, либо получены на основе других измеренных характеристик, либо оценены приближённо по имеющимся в литературе таблицам с использованием информации о типах почвы и растительности. Альтернативой этому могут служить глобальные базы данных по параметрам подстилающей поверхности с различным пространственным разрешением.

Информационное обеспечение по параметрам подстилающей поверхности, взятым из глобальных баз данных (ISLSCP-II, ECOCLIMAP-2; HWSD: Harmonized World Soil Database, STATSGO и др.), разнородно по точности, надёжности и достоверности в отношении различных групп данных и районов земного шара. Это обусловлено разным качеством или отсутствием соответствующих данных измерений, различиями в методиках получения недостающих данных, а также необходимостью перехода от точечных измерений соответствующих характеристик к их площадным оценкам, которые были бы representativeными для обширных территорий.

Тем не менее, тип информационного обеспечения, основанный на глобальных базах данных, весьма привлекателен для модельеров, поскольку избавляет их от трудоёмкого этапа подготовки информации для моделей.

Вторую часть информационного обеспечения определяют метеорологические характеристики, поскольку они обеспечивают информацию о верхнем граничном условии гидрологической системы. В международной литературе они имеют термин «forcing», т.е. вынуждающая сила, поскольку именно эта «сила», в первую очередь, солнечное излучение и другие составляющие энергетического баланса, «раскручивает» гидрологический цикл. Фактически мы имеем тепловую машину, в которой рабочим телом является вода. Поэтому динамика метеорологических характеристик является очень важным информационным блоком. Во многом именно они определяют разделение выпадающих осадков на три ветви гидрологического цикла, возвращающие воду в атмосферу:

поверхностную и подземную составляющие стока и суммарное испарение.

Информация о приземных значениях метеорологических характеристик (включающих температуру и влажность воздуха, атмосферные осадки и давление, приходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, скорость ветра) может быть получена на основе данных измерений (что обычно и делалось раньше). Однако эти данные могут иметь значительные погрешности, обусловленные различными методиками их измерения; точечным характером измерений, приводящим к использованию различных методов пространственной интерполяции или же осреднения полученных данных по территории исследуемого объекта; редкой сетью измерений; неверной трактовкой данных измерений (особенно для зимних осадков в высоких широтах, когда образуются так называемые ложные осадки) и т.д. Кроме того, использование измеренных метеорологических данных для решения с помощью LSMs прогнозистических задач невозможно, потому что таких данных для будущих десятилетий и столетий просто нет.

Поэтому в настоящее время и для этой части информационного обеспечения часто применяется альтернативный подход, основанный на использовании глобальных баз метеорологических данных, рассчитанных с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАиО) или полученных в результате реанализа (NCEP/DOE, ERA-40 и др.). Последние используются для исторического периода, первые помимо этого могут применяться и для решения прогнозистических задач при задании социально-экономических сценариев развития человеческой цивилизации.

В последние годы международное научное сообщество большое внимание уделяет задачам, связанным с оценкой неопределённости расчётов составляющих водного баланса исследуемых бассейнов, в частности, речного стока, обладающего естественной изменчивостью (как в масштабах суток, так и многих лет). Данная изменчивость, как показано в [10, 15], обусловлена хаотическим характером атмосферных процессов (так называемым погодным шумом), их неустойчивостью по отношению даже к малым отклонениям в начальных условиях при дальнейшей эволюции метеорологических характеристик. Этот факт подтверждают и расчёты динамики метеорологических характеристик МОЦАиО [23].

Формирование речного стока и его естественной неопределенности в рамках конкретного бассейна происходит под влиянием вынуждающей силы (forcing), в качестве которой выступают атмосферные процессы, указанная неустойчивость характеристик которых приводит к неустойчивости и значений речного стока. Причиной появления атмосферного хаоса является объективная неустойчивость по отношению к начальным условиям: малое изменение начального условия со временем приводит к достаточно большим изменениям динамики системы. Для нелинейной системы с диссипацией невозможно предсказать конкретный ход её развития, поскольку начальные условия состояния атмосферы никогда не могут быть заданы с абсолютной точностью. Таким образом погодный шум атмосферных процессов приводит к такому же погодному шуму гидрологических процессов.

Оценка масштаба естественной неопределенности характеристик гидрологического режима представляет собой нижнюю грань (инфимум) неопределенности, с которой мы могли бы предсказывать геофизическую характеристику  $X$  (в данном случае значение речного стока), если бы не было изменения внешних воздействий, влияющих на него (в частности, изменения климата или антропогенной деятельности). В качестве меры естественной неопределенности  $Un$  той или иной положительно определенной геофизической характеристики (в настоящей работе стока), имеющей случайную составляющую, использован следующий показатель:

$$Un = (x_{0,975} - x_{0,025}) / M(X), \quad (1)$$

где  $x_{0,975}$  и  $-x_{0,025}$  – квантили 97,5 %-ой и 2,5 %-ой обеспеченности величины  $X$ ,  $M(X)$  – её математическое ожидание. Указанная характеристика представляет собой отношение диапазона, в который может с 95%-й обеспеченностью попасть случайная величина, к её среднему значению. Саму же разность  $Un_{abc} = x_{0,975} - x_{0,025}$  назовём абсолютной неопределенностью величины  $X$ .

Возможные подходы к решению указанных в данном разделе задач рассмотрим на примере работы LSM-модели SWAP (Soil Water – Atmosphere – Plants), разработанной в Лаборатории физики почвенных вод ИВП РАН.

## **LSM-модель SWAP**

Модель SWAP, разрабатываемая авторами статьи с середины 1990-х гг., представляет собой физико-математическую модель, относящуюся к промежуточному по сложности классу LSM-моделей и описывающую процессы тепловлагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой. Отличительная особенность модели SWAP – сочетание её достаточной физической обоснованности и рациональности с точки зрения используемых модельных средств. При этом рациональность обусловлена применением преимущественно аналитических методов решения систем уравнений (в то время как в большинстве существующих моделей используются численные методы) и стремлением к сокращению по мере возможности числа параметров модели.

Входными данными для модели SWAP являются значения метеорологических элементов и параметров подстилающей поверхности, выходными – все составляющие водного и теплового балансов рассматриваемого объекта, а также различные характеристики его теплового и водного режимов (в отличие от чисто гидрологических моделей, предназначенных, как правило, лишь для расчета речного стока). Использование в соответствии с традиционным гидрологическим подходом методов оптимизации для калибровки наиболее важных параметров подстилающей поверхности по данным измерений речного стока за несколько лет позволяет уточнить значения этих параметров и соответственно повысить точность проводимых расчётов.

Используя указанное выше информационное обеспечение, основанное как на данных наблюдений метеорологических станций, так и на глобальных базах данных, а также схематизированное представление исследуемых объектов в виде соединённых речной сетью расчетных ячеек с различным пространственным разрешением, программа SWAP позволяет моделировать гидрологические процессы (включая составляющие водного баланса), а также формирование вертикальных потоков радиации, суммарного испарения, турбулентного теплообмена суши с атмосферой, потоков углекислого газа и динамику других гидрологических и геофизических характеристик речных бассейнов [2, 3].

## **Иллюстрация результатов работы модели SWAP**

Важная стадия разработки модели, связанная с первой из указанных выше задач (получение достаточно адекватного воспроизведения природных процессов), – её проверка на конкретных геофизических объектах (естественных и сельскохозяйственных экосистемах, водосборах, речных бассейнах) на основе сопоставления результатов модельных расчетов с данными наблюдений. Указанная проверка осуществлялась на многочисленных объектах (экспериментальных площадках, малых водосборах, крупных речных бассейнах, а также в масштабах всего Земного шара) как самими авторами, так и на основе их участия в указанных выше международных проектах. Здесь мы приведём лишь несколько примеров такой проверки.

### **Воспроизведение моделью SWAP элементов гидрологического цикла в бассейне р. Роны**

В основе данного исследования – результаты, полученные 15 моделями разных стран в ходе выполнения международного проекта Rhone-AGG по сравнению LSM-моделей [8], выполняемого в рамках экспериментов GEWEX/GLASS всемирной программы по исследованию климата (World Climate Research Programme – WCRP). Цель проекта Rhone-AGG состояла, во-первых, в исследовании способности современных LSM-моделей воспроизводить различные составляющие водного баланса за четырёхлетний период (1985–1989 гг.) для экспериментального бассейна р. Роны площадью 86 996 км<sup>2</sup>, отличающегося большим многообразием природных условий; во-вторых, в исследовании влияния пространственной дискретизации бассейна на результаты расчётов.

Как оказалось, статистические характеристики точности расчёта высоты снежного покрова различными LSM-моделями, полученные по данным, опубликованным в [8] (рис. 1), показывают, что среднеквадратическая ошибка расчетов  $RMSD$  варьирует по моделям от 0,269 до 0,865 м (составляя в среднем 0,425), квадрат коэффициента корреляции  $R^2$  – от 0,087 до 0,74 (в среднем 0,608). При этом наилучшие значения  $RMSD$  и  $R^2$  получились у модели SWAP. Систематическая ошибка  $Bias$  свидетельствует о том, что большинство моделей недооценивают высоту снега в Альпах (максимально на 0,63 м

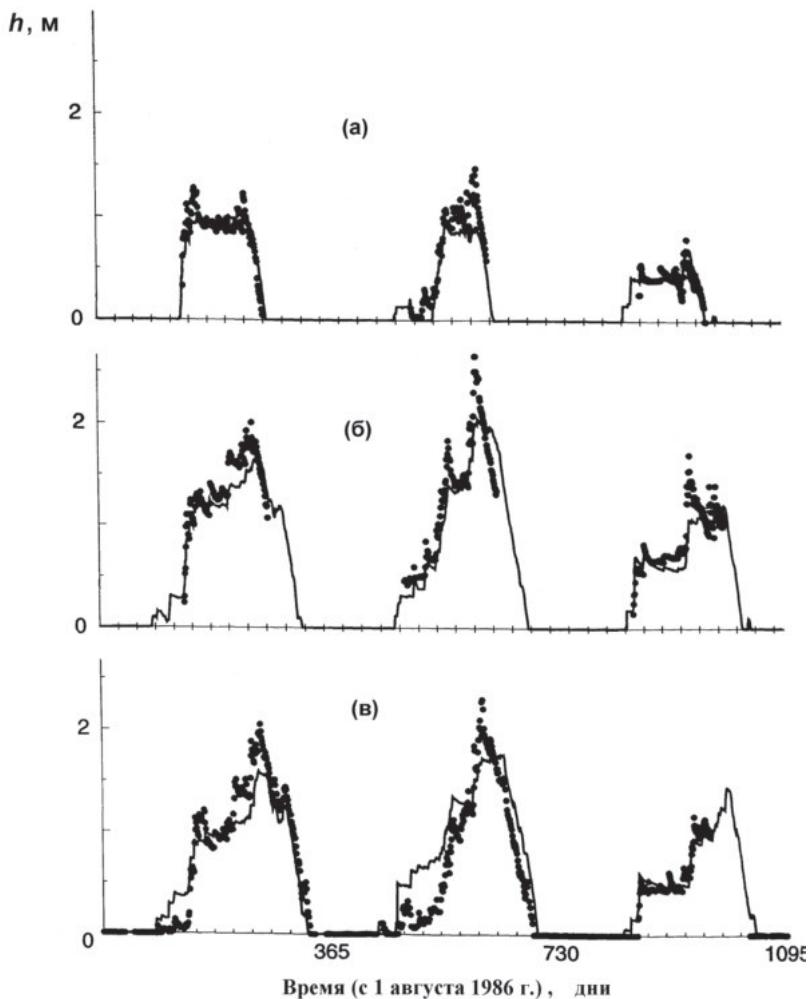


Рис. 1. Динамика измеренных (точки) и смоделированных с помощью модели SWAP (линии) значений высоты снежного покрова  $h$  на площадках Правоньян, Тинь, Нивуаз ле Рошайес (а – в соответственно) во французских Альпах (1986–89 гг.) [8]

при том, что высота снега может достигать 2–3 м). У модели SWAP *Bias* пренебрежимо мал (0,016 м). Таким образом, из всех участвовавших моделей SWAP показала лучшие результаты по моделированию динамики высоты снега в Альпах.

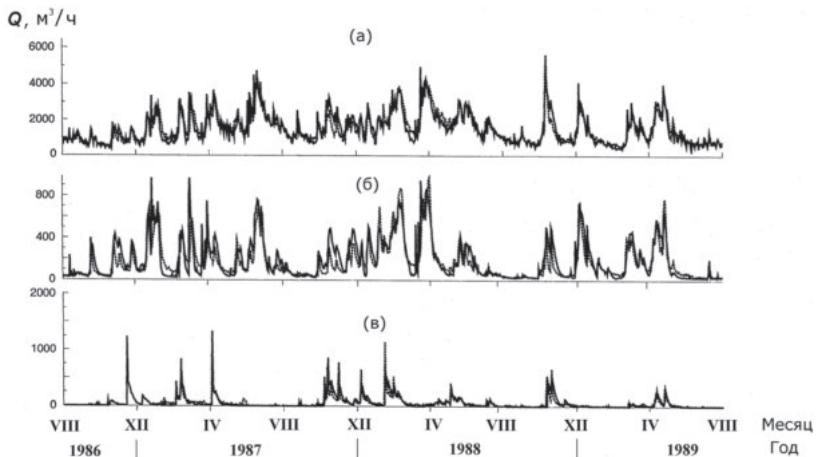


Рис. 2. Динамика измеренных (точки) и рассчитанных на основе модели SWAP (кривые) расходов воды для р. Роны, а также для ее притоков Соны и Ардеш (а – в соответственно) [8].

Динамика суточных расходов измеренного и рассчитанного стока за 3 года для бассейна Роны и её притоков – рек Соны и Ардеш (рис. 2) в целом показала, что SWAP хорошо воспроизводит и эту характеристику. Коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными суточными значениями стока Роны равен 0,91. Общий объём её рассчитанного стока близок к измеренному (отношение объёма рассчитанного стока к измеренному равно 0,998). По способности воспроизводить речной сток в бассейне р. Роны модель SWAP оказалась на втором (из 15) месте после модели ISBA [8], разработанной организаторами проекта Rhone-AGG – сотрудниками Meteo-France.

### **Воспроизведение моделью SWAP элементов гидрологического цикла в районе Западной Африки**

Процессы на поверхности суши играют важную роль в формировании изменчивости муссонов в Западной Африке, особенно в странах Сахеля. Этот регион характеризуется сильной чувствительностью к влажности почвы и большой временной изменчивостью испарения, в связи с чем может считаться горячей точкой планеты во взаимодействии подстилающей поверхности суши с атмосферой.

В рамках указанного выше проекта ALMIP2 была проведена оценка способности воспроизведения двадцатью моделями, разработанными научными коллективами разных стран, водных потоков на основе сопоставления результатов модельных расчётов составляющих водного баланса за 2006–08 гг. с данными измерений на водохранилище озера Агоуфо в области Гурма в Мали. Динамика стока в озеро оценивалась на основе измерений высоты и площади поверхности озера, полученных с помощью дистанционного зондирования [12]. Испарение с водохранилища оценивалось также дистанционно на 17 измерительных площадках.

На рис. 3 показано сопоставление рассчитанных разными моделями средних за указанный период объёмов стока с его измеренным значением. Видно, что наилучшие результаты показала модель SWAP. Кроме того, здесь также приведена динамика суммарного испарения за 2007 г. для экспериментальной площадки №17 водохранилища Агоуфо, показывающая удовлетворительное согласие измеренных данных и рассчитанных на основе модели SWAP.

Ещё одним объектом исследования в рамках ALMIP2 являлась верхняя часть бассейна р. Веме, расположенного в Северном Бенине, площадью ~14 400 км<sup>2</sup> [11]. Наблюдённые метеорологические характеристики, необходимые для проведения модельных расчётов, были интерполированы по территории бассейна. В частности, распределение осадков по расчётным ячейкам осуществлялось на основе операции кригинга.

Статистика соответствия воспроизведённых разными LSM-моделями и измеренных суточных расходов стока верхней части бассейна р. Веме представлена на рис. 4. Она показывает, что в соответствии с полученными значениями нормализованной среднеквадратической ошибки расчёта стока *NRMSE* и эффективности расчёта по Нэшу-Сатклифу *NS* модель SWAP оказалась на втором месте среди всех моделей.

Как приведённые выше сопоставления воспроизводимых моделью SWAP характеристик гидрологического режима речных бассейнов, так и другие многочисленные её проверки, проведенные для разных по масштабам объектов, находящихся в самых различных природных условиях, показали, что модель SWAP может быть использована для решения различных гидрологических и водохозяйственных задач.

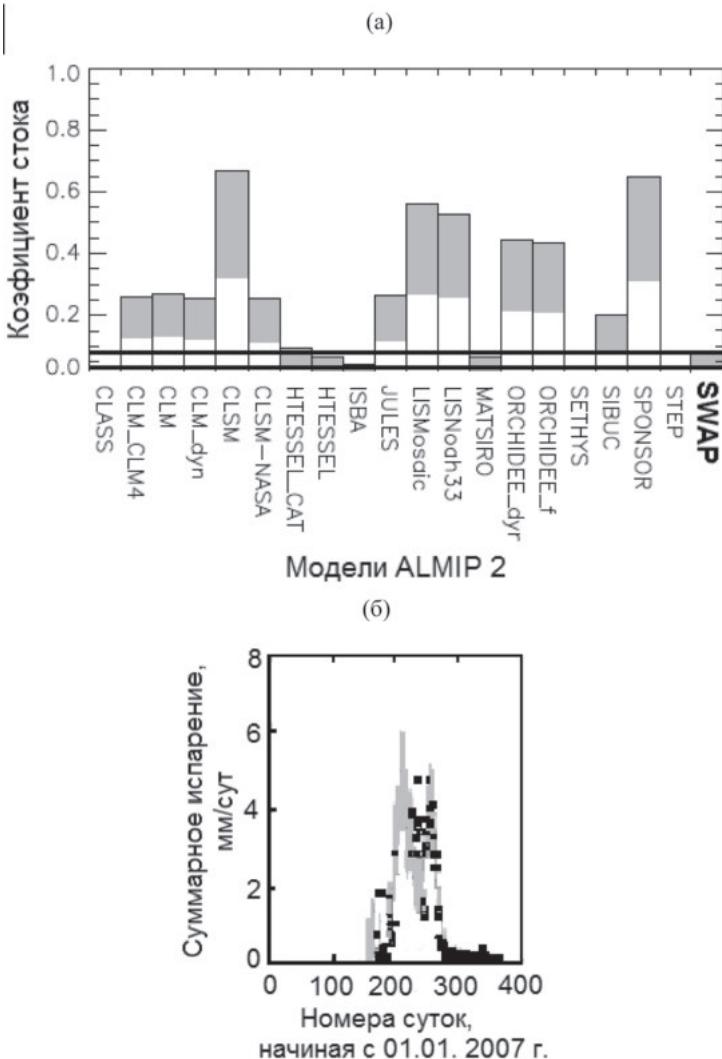


Рис. 3. Сопоставление гидрологических характеристик, рассчитанных в рамках проекта ALMIP-2, с данными наблюдений [12].

(а) – Диапазон коэффициентов годового стока, рассчитанных на основе разных моделей ALMIP-2 за период 2006 – 2008 гг. (серые прямоугольники) по сравнению с диапазоном измеренных коэффициентов стока для водосбора озера Агоуфу за тот же период (границы диапазона показаны горизонтальными жирными линиями).

(б) – Суточное суммарное испарение, рассчитанное на основе модели SWAP (серая линия) и измеренное дистанционным методом (черные квадраты) для 2007 г. на измерительной площадке №17 водосбора озера Агоуфу.

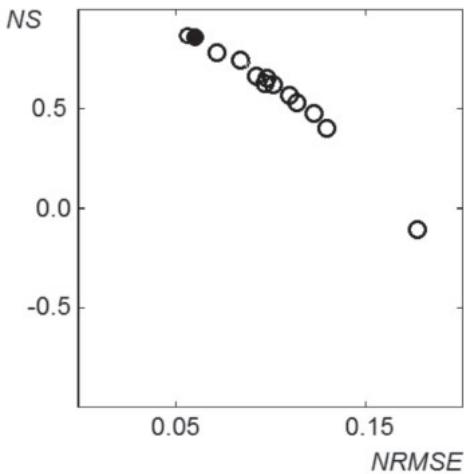


Рис. 4. Статистика соответствия воспроизведенных 14-ю разными LSM-моделями проекта ALMIP-2 и измеренных суточных расходов стока верхней части бассейна р. Веме [11]. Чёрный кружок соответствует результатам модели SWAP, пустые кружки – остальным участвовавшим в данном эксперименте 13 моделям

зяйственных задач, в частности, задач прогнозирования изменения гидрологического режима речных бассейнов при возможных изменениях климата.

#### **Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса в северных речных бассейнах в связи с возможным изменением климата**

Поступление пресной воды в Северный Ледовитый океан в виде речного стока с дренажной территории пан-Арктического бассейна составляет примерно 50% от её суммарного поступления [7]. Для других океанов это соотношение гораздо ниже, поскольку среди приходных составляющих пресных вод, как правило, доминируют осадки, выпадающие на поверхность океанов. В то же время результаты использования климатических моделей в целом свидетельствуют о том, что прогнозируемое глобальное потепление в наибольшей степени будет сказываться именно на высоких северных широтах, приводя к увеличению в этой зоне осадков и усилиению снеготаяния. Вызванные этими факторами изменения гидрологического режима территории пан-Арктического бассейна могут оказать значительное влияние как на водно-солевой баланс самого Арктического бассейна, так и на водный баланс его дренажной территории, что отразится на функционировании экосистем данного региона. Тем не менее, вопрос о том, как глобальное потепление

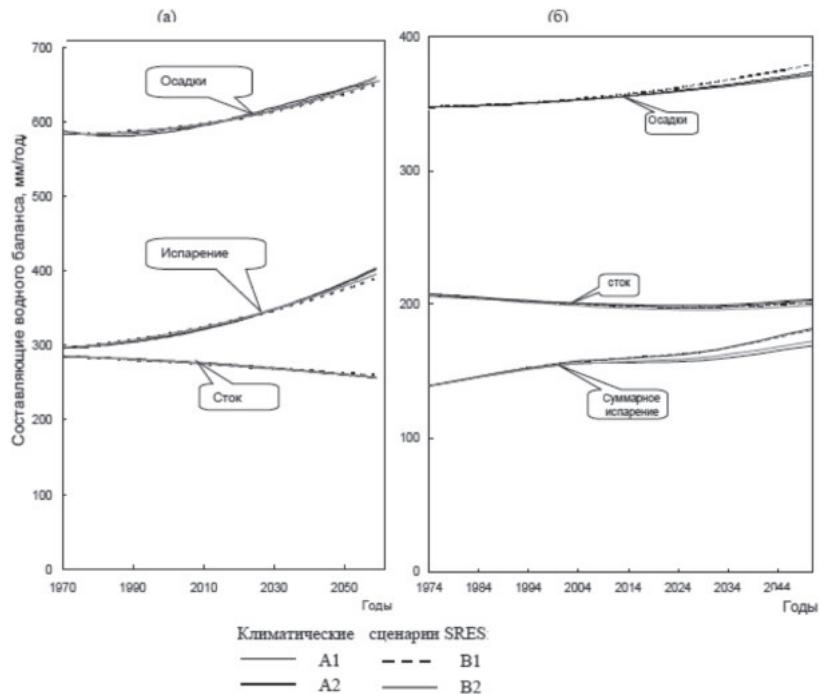


Рис. 5. Эволюция в конце ХХ в. и первой половине ХХI в. годовых сумм осадков, стока и суммарного испарения, рассчитанных по модели SWAP в соответствии с семейством климатических сценариев SRES: A1 (1), A2 (2), B1 (3) и B2 (4) и осредненных для бассейнов рек Северной Двины (а) и Лены (б).

скажется на гидрологическом цикле и динамике его элементов в арктическом регионе, только начинает изучаться, полученные предварительные результаты неоднозначны и требуют дальнейших исследований, включающих в себя разработку более точных методик оценки указанных изменений. Поэтому в данном разделе мы проиллюстрируем возможность использования модели SWAP для получения сценарных прогнозов изменения гидрологического режима северных рек РФ.

За основу прогнозов климатических изменений в данном регионе, необходимых для получения метеорологических прогнозов примерно до середины второй половины 21 в. были взяты четыре альтернативных сценария Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), относящиеся к семейству сценариев SRES (Special Report on Emissions Scenarios):

A1, A2, B1, B2 [20], использованных при разработке третьего оценочного доклада МГЭИК на Седьмой конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Марракеш, Марокко, 7 ноября 2001 г.). На их основе по специальной методике [16] были получены прогнозы динамики соответствующих климатических элементов, необходимые для задания верхних граничных условий в задаче прогнозирования изменения характеристик гидрологического режима исследуемых речных бассейнов. В данной работе в качестве примера мы приведём полученные результаты сценарных изменений составляющих водного баланса для бассейнов двух северных рек РФ: Северной Двины и Лены.

На рис. 5а, б показана климатическая динамика составляющих водного баланса бассейна указанных рек с 1967 по 2063 гг. При климатическом осреднении было выбрано четыре временных периода: 1967–90, 1991–2014, 2015–38 и 2039–63 гг., по которым проводилось осреднение рассчитанных составляющих водного баланса.

Как видно, для бассейнов обеих рек к началу 2-й половины 21 в. довольно значительно вырастают осадки и суммарное испарение, а сток несколько уменьшается. Для бассейна Северной Двины, находящейся в более мягких климатических условиях, указанные изменения выражены сильнее, чем для находящегося в Сибири бассейна Лены. Также приведённые иллюстрации показывают, что для всех четырёх климатических сценариев семейства SRES результаты изменений составляющих водного баланса рассмотренных бассейнов очень близки.

#### **Естественная (вызванная погодным шумом) неопределенность стока выбранных рек**

Последней задачей, рассмотренной в настоящей статье и решаемой на основе модели SWAP, является оценка естественной изменчивости составляющих водного баланса речного бассейна, вызванной, как было указано выше, погодным шумом метеорологических характеристик.

На рис. 6 показаны средние за расчётный период значения рассчитанного годового стока для рек Лены (РФ), Ганг (Индия) и Дарлинг (Австралия), диапазон его естественной изменчивости (абсолютной неопределенности), а также имеющиеся измеренные конкретные реализации стока за тот же период (периоды для всех рек

разные). Значение неопределенности годового стока конкретной реки *Ил* (в предположении, что его функция распределения вероятности может быть аппроксимирована логнормальным распределением) было оценено на основе рассчитанных для каждого года значений стока. Полученные результаты показывали, что измеренные значения годового стока всех рассмотренных рек в основном (с 95%-й вероятностью) лежат в рассчитанном диапазоне его неопределенности. Сами значения диапазонов неопределенности стока разных рек довольно широко варьируют в зависимости природных условий речных бассейнов. В частности, они зависят от степени детерминированности годового хода питания реки. Наименьшая неопределенность стока соответствует рекам с более или менее выраженной внутригодовой цикличностью их питания.

Так, относительно малые значения неопределенности стока имеет Лена с преобладанием снегового питания и четко выраженной внутригодовой цикличностью.

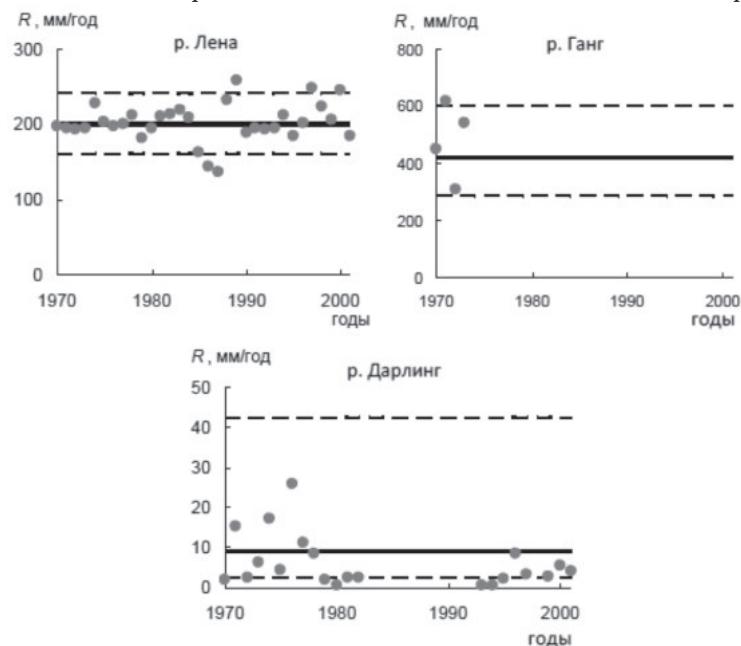


Рис. 6. Неопределенность годовых значений стока для рек Лены, Ганга и Дарлинга. Чёрная линия – рассчитанное среднемноголетнее значение годового слоя стока, пунктирующая линия – границы рассчитанного диапазона абсолютной неопределенности годового стока с 95%-й обеспеченностью, серые кружки – измеренные значения годового стока в отдельные годы

ным весенним половодьем. Примерно такая же неопределенность стока и у р. Ганг, обладающей более или менее выраженной цикличностью питания водами летних муссонных дождей. Значительно большей неопределенностью характеризуется сток р. Дарлинг. Это связано с тем, что климат в бассейне Дарлинга можно отнести к тропическому пустынному, в связи с чем не только месячные, но и годовые осадки очень сильно варьируют в пространстве и времени, приводя к большой изменчивости стока.

Полученные значения естественной неопределенности как годовых значений стока рассмотренных рек, так и их климатических гидрографов могут быть использованы для сравнения с прогнозируемыми изменениями годовых и месячных значений климатического стока в связи с возможным изменением климата планеты и усилением антропогенного воздействия.

### **Заключение**

Представленный обзор проблемы изучения взаимодействия поверхности суши с атмосферой показал, что одним из перспективнейших подходов к её решению является физико-математическое моделирование, основанное на описание механизмов тепло- и влагообмена в системе «почва – растительный/снежный покров – атмосфера». Систематизацией описания указанных процессов стал комплекс различных моделей взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой, в англоязычной литературе известный как LSMs.

Данный инструментарий открывает широкий круг возможностей для решения гидрологических, геофизических, экологических, водохозяйственных и других задач (в том числе и политических). Особенно важно то обстоятельство, что он применим в условиях как современного, так и изменяющегося климата и антропогенного воздействия, вызванного постоянным количественным и качественным ростом потребностей человеческой цивилизации. LSM-модели могут в какой-то мере послужить инструментом поиска компромисса между ограниченными возможностями биосфера и растущими потребностями человечества.

Что касается самих LSM-моделей, то они ещё требуют дальнейшего совершенствования в плане описания природных процессов, учёта в них хозяйственной деятельности человека, сопряжения их с

моделями общей циркуляции атмосферы и океана, подготовки информационного обеспечения, оценки неопределённости получаемых прогнозистических характеристик, связанных с прогнозами изменения климата и т.д. К LSM-модели могут быть подключены блоки, связанные с расчётом эрозии почв на водосборе, баланса углекислого газа, роста вегетирующего покрова суши, формирования качества вод суши и т.д. В любом случае LSM-модели являются одним из наиболее перспективных инструментов для решения указанных выше задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Т. 5. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 422 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Методика оценки динамики водного и углеродного балансов экосистемы хвойного леса // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. №1. С. 81–92.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
4. Розинкина И.А. Модель Гидрометцентра России почва - растительность - приземный слой атмосферы: алгоритм и результаты тестирования // Метеорология и гидрология, 2001, №3, стр. 19–33.
5. Фолсом К. Происхождение жизни. М.: Мир, 1982. 160 с.
6. Шмакин А.Б. Параметризация процессов в снежном покрове, промерзающей и оттаивающей почве для моделей климата // Метеорология и гидрология, 1999, №2, с. 32–44.
7. Barry R.G., Serreze M.C. Atmospheric components of the arctic ocean freshwater balance and their interannual variability // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean/Eds. Lewis E.L., Jones E.P., Lemke P. et al. N.Y.: Springer, 2000. P. 45–56.
8. Boone A., Habets F., Noilhan J., Clark D., Dirmeyer P., Fox S., Gusev Y., Haddeland I., Koster R., Lohmann D., Mahanama S., Mitchell K., Nasonova O., Niu G.-Y., Pitman A., Polcher J., Shmakin A. B., Tanaka K., van den Hurk B., Verant S., Verseghy D., Viterbo P., Yang Z.-L. The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // J. Climate. 2004. V. 17. 187–208.
9. Dickinson R.E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J., Wilson M.F. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model // Tech. Note NCAR/RN-275+STR. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado, USA. 1986. 69 p.
10. Gelfan A., Semenov V. A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev, E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by the internal atmospheric variability // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015. №19. P. 2737–2754, 2015 [www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2737/2015/](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2737/2015/) doi:10.5194/hess-19-2737-2015.

11. Getirana A., Boone A., Peugeot C., and the ALMIP-2 Working Group (Gusev Ye.M., Nasonova O.N., et al.). Streamflows over a West African basin from the 1 ALMIP-2 model ensemble // *J. Hydrometeorology*. (in press).
12. Grippa M., Kerfoot L., Boone A., Peugeot C., Demarty J., Cappelaere B., Gal L., Hiernaux P., Moughin E., Anderson M., Hain C., and the ALMIP2 working group (Gusev Ye.M., Nasonova O.N. et. al.). Modelling surface runoff and water fluxes over contrasted soils in pastoral Sahel: evaluation of the ALMIP2 land surface models over the Gourma region in Mali // *J. Hydrometeorology*. (in press).
13. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The Land Surface Parameterization scheme SWAP: description and partial validation // *Global and Planetary Change*. 1998. V.19. №1-4. P. 63–86.
14. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The simulation of heat and water exchange at the land-atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP // *Hydrological Processes*. 2002. V. 16. №10. P. 1893–1919.
15. Gusev Ye. M., Nasonova O. N., Dzhogon L. Ya., Kovalev E. E. Scenario forecasting changes in the water balance components of the Olenek and Iindigirka river basins due to possible climate change // Proc. IAHS, №371, pp. 13–15, 2015, proc-iahs.net/371/13/2015/ doi:10.5194/piahs-371-13-2015.
16. Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogon L.Ya., Kovalev E.E. The application of the land surface model for calculating river runoff in high latitudes // *Water Resour.* 2008. Vol. 35. №2, pp. 171–184.
17. Hortal M. Aspects of the numerics of the ECMWF model // Recent developments in numerical methods for atmospheric modelling. – Procs. of the ECMWF Seminar 7–11 September 1998. Reading. UK. 1999. P. 50.
18. Lettenmaier D.P. Modelling of Runoff and Streamflow at Regional to Global Scales // The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change (Ed. H.R.Oliver, S.A.OLiver), NATO ASI Series 1: Global Environmental Change. 1995. Vol. 31. P. 297–316.
19. Morowitz H.J. Energy flow in biology: biological organization as a problem in thermal physics. N.Y.: Acad.Press. 1968. 179 p.
20. Nebojsa N., Alcamo J., Davis G., et al. IPCC Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 570 pp.
21. Noilhan J., Mahfouf J.-F. The ISBA land surface parameterization scheme // *Global Planetary Change*. 1996. V. 13. P. 145–159.
22. Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalcher A. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models // *J. Atmos. Sci.* 1986. V. 43. P. 505–531.
23. Shuttleworth W.J. Soil-Vegetation-Atmosphere Relations: Process and Prospect // The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change. NATO ASI Series. Series 1: Global Environmental Change. V. 31. 1995. P. 135–162.
24. Verseghy D.L. CLASS - Canadian land surface sheme for GCMs. I. Soil model // *Int. J. Climatol.* 1991. V.11. P. 111–113.

# **Моделирование полей характеристик речного стока**

*Ю.Г. Мотовилов*

## **Введение**

В задачах планирования и управления водными ресурсами речных бассейнов все чаще возникает необходимость использования пространственно-распределённых гидрологических моделей, в особенности в случаях, когда желательно учесть пространственную изменчивость стокообразования, обусловленную распределением по территории водосбора климатических факторов, рельефа, почв, растительности и других характеристик подстилающей поверхности [27]. Однако до настоящего времени в мировой гидрологической практике имеются лишь единичные примеры исследований, связанных с моделированием пространственных полей характеристик гидрологического цикла суши для крупных речных бассейнов и территорий [8, 13, 14, 19, 23, 24, 31]. Это обусловлено в первую очередь, ограничениями в доступности пространственно-распределённой информации гидрометеорологического мониторинга, масштабными ограничениями пространственно-распределённых гидрологических моделей и отсутствием устоявшихся методик задания и калибровки полей модельных параметров.

Бурное развитие и становление пространственно-распределённых физико-математических моделей формирования стока пришлись на 1980-е гг., причём в СССР это направление активно развивалось Л.С. Кучментом и его школой [10, 11], однако уже в 1990-е гг. эйфория от успехов в описании и моделировании отдельных процессов гидрологического цикла заметно снизилась, и на протяжении последних 20-ти лет в гидрологическом сообществе активно дискутируются проблемы физико-математического моделирования речных бассейнов. Наиболее яркие критики этого направления в моделировании – К. Бивен [16, 17] и Ю.Б. и Т.Б. Виноградовы [2, 3]. Основная суть претензий к физико-математическим моделям сводится к тому, что уравнения математической физики неадекватно описывают ряд гидрологических процессов и применяются на реальных водосборах для несвойственных пространственных масштабов, где параметры моделей не могут быть измерены и их необхо-

димо калибровать подобно тому, как это делается в концептуальных моделях стока.

По мнению некоторых гидрологов, характерный масштаб речных бассейнов при использовании традиционных физико-математических моделей формирования стока ограничивается размерами небольшого (элементарного) речного бассейна. В его пределах с помощью таких моделей можно с большой детальностью воспроизводить гидрологические процессы на различных частях склонов (характерный масштаб расчётной ячейки – сотни квадратных метров) и в русловой сети. При гидрологическом моделировании больших территорий и крупных речных систем целесообразно использовать и более крупные расчётные ячейки порядка десятков, сотен или даже тысяч квадратных километров. При этом необходимо дополнительное теоретическое обоснование проблемы масштабирования в гидрологических моделях. Проблема заключается в нахождении новых (по сравнению с точкой) расчётных единиц определённого масштаба, генерализации (фильтрации) микромасштабных флуктуаций характеристик, имеющих второстепенное значение на данном уровне рассмотрения, параметризации моделей гидрологических процессов на мезо- или макромасштабном уровне и нахождении эффективных параметров моделей.

Определёнными вехами на пути разрешения проблемы масштаба являются выдвинутая Е. Вудом с соавторами [30] концепция «репрезентативной элементарной области»(representativeelementaryareaREA) и предложенное П. Реджиани с соавторами [28] понятие репрезентативного элементарного водосбора(representativeelementarywatershedREW). Не вдаваясь в детали, смысл этих концепций заключается в нахождении новых (по сравнению с точкой) расчётных единиц определённого масштаба (REA или REW) и генерализации алгоритмов и параметров гидрологических моделей для этого масштаба. В рамках предложенных концепций элементарный водосбор может являться расчётной единицей для моделирования крупного речного бассейна, состоящего из множества таких элементарных водосборов. В этом случае для описания гидрологических процессов уже не требуется такая пространственная детализация, как в оригинальных физико-математических моделях – в агрегированных моделях оперируют осреднёнными в пределах элементарных водосборов пото-

ками. Поэтому для описания гидрологических процессов здесь могут быть использованы упрощённые модели, в рамках которых элементарный бассейн рассматривается как расчётная точка (модель с сосредоточенными «эффективными» параметрами).

В частности, такая идеология принята в гидрологической модели ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics) [12, 25, 26], где территория речного бассейна покрывается регулярной сеткой из элементов REA [26] или нерегулярной сеткой из элементарных водосборов [13, 14], для каждого из которых физически обоснованная модель с сосредоточенными параметрами описана системой обычновенных дифференциальных уравнений, большая часть которых получена либо интегрированием базисных уравнений детальных физико-математических моделей по пространству, либо путём отбрасывания второстепенных членов этих уравнений, имеющих малый вклад в сущности протекающих гидрологических процессов на водосборе, либо привлечением принципиально иных упрощённых схем описания процессов, разумных в принятых пространственно-временных масштабах и нередко используемых в концептуальных моделях. Такого рода модели сохраняют основные черты и преимущества пространственно-распределённых физико-математических моделей, и в то же время они более эффективны при решении прикладных и исследовательских задач на более крупных речных бассейнах, так как они менее требовательны к составу и полноте исходной информации, а также менее чувствительны к ошибкам в задании этой информации. Модель ECOMAG прошла испытания на многих речных бассейнах в различных пространственных масштабах [19, 20, 24, 25] и доказала свою эффективность для расчёта гидрографов стока, в том числе на неизученных водосборах [22, 26], а также при моделирования динамики полей характеристик гидрологического цикла (влажности почвы, запасов воды в снежном покрове, модулей стока) [13, 14].

### **Пространственная схематизация водосборов для крупных речных бассейнов**

Чтобы моделировать процессы гидрологического цикла и стекания воды по склонам водосбора и в русловой сети, необходимо провести модельную схематизацию поверхности бассейна и речной сети, информация об их древообразной структуре: – какая река в

какую реку впадает, протяжённость притоков, прилегающие склоны, с которых вода попадает на данный участок реки, типы почв и землепользования на этих участках и т.д., – закладывается в модель. В связи с этим важный компонент модельного комплекса ECOMAG – специализированный ГИС-комплекс Ecomag Extension, предназначенный для автоматизированной модельной схематизации речного бассейна [13] на основе построения полей линий тока, направлений потоков и полей аккумуляции потоков по цифровой модели рельефа (ЦМР). Ячейки с большой величиной аккумуляции (накопления) потоков образуют модельную гидрографическую сеть. После этого включается процедура разбиения рассматриваемого бассейна на расчётные водосборы, представляющие собой частные водосборные площади между узлами (точками слияния притоков) речной сети. Эти водосборы – расчётные пространственные элементы модели. Заключительным этапом моделирования речной сети является её структурно-гидрографический анализ.

Таким образом, в качестве основной расчётной пространственной единицы (расчётной ячейки) для моделирования крупных речных бассейнов в современной версии модели ECOMAG принимается водосбор малой реки (расчётный водосбор). Ввиду условности понятия «водосбор малой реки», размеры таких расчётных ячеек могут варьировать в широких пределах в зависимости от размеров речного бассейна и необходимой степени детальности его описания, задаваемой в комплексе Ecomag Extension с помощью критического числа ячеек сетки ЦМР, при «слиянии» которых образуется модельная речная сеть.

### **Методика калибровки модельных параметров**

Большая часть параметров модели ECOMAG задаётся из баз данных характеристик подстилающей поверхности на основе почвенной и ландшафтной цифровых карт с использованием региональных справочников агрофизических и агрогидрологических свойств почв и других литературных источников. Существуют различные методологические подходы к учёту пространственной неоднородности физических параметров моделей внутри расчётных ячеек, например, введение статистических распределений почвенных параметров в явном виде [8], расчёт по квантилям распределений [3,

11] и др. Однако наиболее распространённый и простой подход заключается в совместном использовании статистических распределений и осреднённых по площади «эффективных» параметров [6, 21, 22]. Недостатки такого подхода из-за нелинейности исходных уравнений очевидны. В то же время отсутствие сколько-нибудь надёжной информации не только о статистических моментах более высокого порядка некоторых физических параметров, но и зачастую об их средних площадных значениях, на данном этапе делает этот методологический подход наиболее эффективным при решении гидрологических задач [7]. В модели ECOMAG задействованы возможности статистических распределений и различных процедур пространственного осреднения параметров подстилающей поверхности с использованием ряда аппроксимаций и допущений [12]. Было показано, что из-за нелинейности процессов влагообмена эффективность различных процедур осреднения параметров (среднеарифметическое, среднегармоническое, среднегеометрическое) и вносимые ошибки при расчётах результирующих потоков связаны с конкретными алгоритмами для расчёта этих процессов. Более того, в ряде случаев удается получить аналитические оценки погрешностей, вносимых тем или иным способом осреднения параметров в расчётных ячейках речных бассейнов при переходе от точечного масштаба к масштабу ландшафтно-однородной ячейки REA и далее к масштабу элементарного (или более крупного по размерам) водосбора – расчётной ячейки модели ECOMAG.

Конечно, не все параметры модели могут быть заданы на основе карт, несколько ключевых параметров (в первую очередь, вертикальный и горизонтальный коэффициенты фильтрации для типов почв и грунтов, мощность верхнего почвенного горизонта A и коэффициенты стаивания для различных типов ландшафтов и др.) уточняются в процессе калибровки (корректировки) полей модельных параметров пространственно-распределённых гидрологических моделей. К сожалению, перенос имеющегося опыта калибровки по стоку в замыкающем створе водосбора в распределённых моделях неизбежно приводит к эффектам перепараметризации моделей – невозможности получения устойчивого набора значений параметров, и экви-финальности – близости результатов моделирования с различными значениями наборов модельных параметров [2, 3, 9, 16, 18].

Для устранения причин эффектов перепараметризации и эквивалентности моделей, связанных с некорректной калибровкой модельных параметров, может быть рекомендована следующая схема:

- задание большей части физически обоснованных параметров распределённых гидрологических моделей для крупных речных бассейнов должно производиться на основе глобальных баз картографических тематических данных региона (рельеф, типы, механический состав и водно-физические характеристики почв, типы и характеристики растительности и ландшафтов);
- калибровку ряда параметров распределённых моделей, ответственных за определенные процессы, целесообразно проводить по данным регионального гидрометеорологического мониторинга этих процессов, например, параметры испарения и миграции почвенной влаги – по данным пространственных измерений (полей) влажности почвы, параметры подмодели снежного покрова – по данным снегомерных съёмок в регионе и т.п.;
- с целью сокращения количества калибруемых параметров калибровка в пространственно-распределённых моделях должна выполняться не для каждой пространственной ландшафтно-гидрологической единицы речного бассейна (например, элементарного водосбора), а для характерных типов почв и ландшафтов, слагающих эти элементарные водосборы.

Подчеркнём один важный момент, касающийся калибровки ключевых параметров модели ECOMAG. Процедура калибровки организована таким образом, чтобы сохранить соотношение между начальными значениями конкретного параметра, связанного с различными типами почв или растительного покрова. Это означает, что вместо абсолютных значений параметра для каждого типа почвы или растительного покрова калибруется множитель к абсолютным начальным значениям параметра для всех типов подстилающей поверхности [13]. Например, при калибровке коэффициентов фильтрации почвогрунтов такой подход позволяет сохранить основные соотношения между типичными значениями этих коэффициентов для различных по механическому составу (песчаных, супесчаных, суглинистых, глинистых) типов почв. Аналогичным образом в процессе калибровки ищется множитель к значениям

коэффициентов стаивания для различных типов подстилающей поверхности (лес, луг, поле и т.д.). Таким образом, описанный подход позволяет проводить калибровку параметров пространственно-распределённых гидрологических моделей для крупных речных бассейнов со значительным разнообразием типов почв и растительности в подстилающей поверхности.

Технологически воплощение этой схемы связано с привлечением современного аппарата обработки и анализа пространственно-распределённой картографической и мониторинговой информации средствами ГИС-технологий. Кроме того, успех от реализации такого подхода возможен только при наличии пространственных данных мониторинга характеристик гидрологического цикла суши в речных бассейнах (влажности и промерзания почвы, снежного покрова, расходов воды). При отсутствии таких данных результаты сравнения эффективности различных типов гидрологических моделей для небольших водосборов [16] не выявили заметных преимуществ распределённых моделей перед моделями с сосредоточенными параметрами, в особенности, когда речь идёт о расчётах стока в замыкающих створах водосборов. Эти преимущества проявляются при необходимости расчётов гидрографов стока и других характеристик гидрологического цикла суши в различных точках речного бассейна [9].

Следует отметить, что в силу ряда обстоятельств (в первую очередь, практическое отсутствие пространственно-распределённой расчётной информации по гидрологическим моделям для крупных территорий, трудности построения фактических полей характеристик водного баланса из-за скудости и нерегулярности поступления данных, а также редкой сети гидрометеорологического мониторинга и др.) до настоящего времени не выработались определённые стандарты количественных методов сравнения гидрологических полей. Поэтому в данном случае могут быть использованы подходы, подобные задействованным в гидрологической практике расчётов для оценки соответствия фактических и рассчитанных скалярных величин, например расходов воды, по критерию Нэша–Сатклифа (NS), рассчитываемому по формуле:

$$NS = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}, \quad (1)$$

где  $F_0^2 = \sum_i (Q_i - Q_{\text{ср}})^2$ ,  $F^2 = \sum_i (Q_{i,p} - Q_i)^2$ ,  $Q_{i,p}$  – рассчитанный по

модели расход воды в  $i$ -е сутки,  $Q_i$  – фактический расход,  $Q_{\text{ср}}$  – средняя величина фактического расхода воды за период расчёта. Чем ближе  $NS$  к единице, тем выше точность моделирования, т.е. меньше средняя и среднеквадратическая погрешности расчёта гидрографа стока. Величины  $NS \leq 0$  означают, что модель неэффективна, при  $NS \geq 0,75$  соответствие гидрографов можно считать хорошим.

Критерий (1) показывает степень соответствия рассчитанных и фактических гидрографов для одной мониторинговой точки речной сети, например, в замыкающем створе водосбора. Для целей одновременного учёта эффективности модели в нескольких мониторинговых точках существуют следующие две возможности задания целевой функции:

1) осреднённый критерий в виде  $NS = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M NS_i$ , где  $M$  – коли-

чество пунктов сравнения;

2. средневзвешенный критерий в виде (1), в котором  $F_0^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k} - Q_{\text{ср}})^2$ ,  $F^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k,p} - Q_{i,k})^2$ ,  $Q_{i,k,p}$  – рассчитанный

по модели расход воды в  $i$ -е сутки в  $k$ -ом пункте сравнения,  $Q_{i,k}$  – фактический расход в  $i$ -е сутки в  $k$ -ом пункте сравнения,

$Q_{\text{ср}} = \frac{1}{MN} \sum_k \sum_i Q_{i,k}$  – средневзвешенная по всем пунктам сравнения

$M$  величина фактического расхода воды за период расчёта в  $N$  суток. В первом варианте всем створам гидрометрической сети придается одинаковый вес. Во втором случае производится взвешивание критерия  $NS$  с признаком больших весов гидрометрическим створам с большими расходами.

Кроме критерия  $NS$ , для характеристики точности модельных результатов часто рассчитываются также значения корреляционного отношения  $R^2$  связей рассчитанных и фактических месячных, квартальных и годовых объёмов стока. Еще один критерий  $Bias$  характеризует относительную погрешность расчёта среднегодовых объёмов стока.

При сравнении динамики полей в качестве  $Q_{i,p}$  и  $Q_i$  фигурируют уже не уникальные значения характеристики в момент времени  $i$ , а

матрицы фактических и расчётных полей в момент времени  $i$ ; в качестве  $Q_{\text{ср}}$  может рассматриваться среднее за период расчёта поле фактической величины либо среднее значение поля фактической величины за период расчёта. При этом сравнение рассчитанных и фактических полей в каждый момент времени осуществляется по всем узлам сетки матрицы полей.

### **Моделирование динамики полей запасов воды в снежном покрове и влажности почвы в бассейне Волги**

Испытания технологии моделирующего комплекса ECOMAG, который помимо ядра – модели формирования стока ECOMAG, включает мощные средства информационной и технологической поддержки (базы данных гидрометеорологической информации, тематические цифровые электронные карты различных масштабов, цифровые модели рельефа различного пространственного разрешения, средства управления базами данных и геоинформационной обработки пространственной информации, графическое сопровождение, управляющую оболочку и т.д.), покажем на примере моделирования динамики пространственных полей запасов воды в снежном покрове и влажности почвы в бассейне Волги [13] – важнейших характеристик кругооборота тепла и влаги в атмосфере и на суше. Для расчётов по модели привлекались цифровые карты (топографические карты миллионного масштаба; цифровые модели рельефа километрового разрешения, тематические карты (почвенная, ландшафтная и т.д.), карты-схемы расположения пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды), а также информация агрогидрометеорологического мониторинга. В пределах бассейна Волги и в непосредственной близости от его границ для расчётов и сопоставления с данными режимных наблюдений было задействовано около 350 метеостанций, 230 агрометстанций с измерениями влажности почвы, 370 пунктов маршрутных снегомерных наблюдений, около 100 гидрологических постов и 20 створов крупнейших ГЭС.

Расчёты по модели проводятся с суточным шагом по времени. Ежедневные поля метеохарактеристик на территорию речного бассейна являются входом в модель. Модель в непрерывном режиме рассчитывает поля различных характеристик гидрологического цикла. В процессе поэтапной калибровки параметров и моделирования полей снежного покрова и влажности почвы в бассейне Волги

фактические поля этих характеристик строились соответственно по данным маршрутных снегомерных наблюдений и измерений продуктивной влаги на агрометеорологических станциях в конкретные даты (раз в декаду) путём интерполяции значений в узлы пространственной километровой сетки с помощью ГИС-технологии. Рассчитанные по модели снегозапасы и влажности почвы для каждого из пространственных расчётных элементов модели в узлах километровой сетки в пределах расчётного водосбора (расчётной ячейки) задавались постоянными величинами, равными моделируемым значениям в центре этих расчётных единиц.

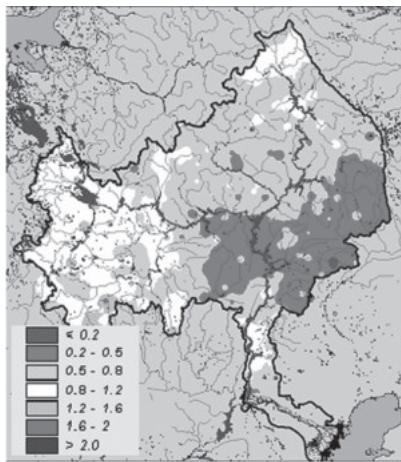
При моделировании полей запасов воды в снежном покрове калибровались два параметра модели: температурный коэффициент стаивания снега и критическая температура фазового состояния выпадающих атмосферных осадков (снег или дождь). Калибровка подмодели снежного покрова проводилась по данным снегомерных наблюдений за период 2001–03 гг. Проверка модели осуществлялась для периода 2004–11 гг.

При расчётах полей влажности почвы в бассейне Волги калибровались два параметра модели в формуле испарения из почвы. Калибровка проводилась по полям запасов продуктивной влаги (мм) в верхнем 50-сантиметровом слое почвы в бассейне Волги за период вегетации, близкого к среднему по увлажнению 2007 г. Проверка модели выполнялась для периодов вегетации экстремально засушливого 2010 г. и увлажненного 2011 г.

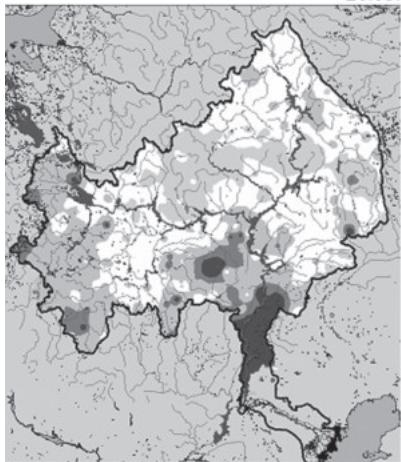
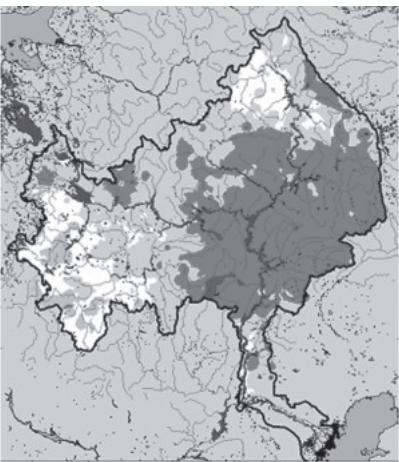
Для калибровки параметров и оценки точности модели при сравнении фактических и расчётных полей характеристик гидрологического цикла использовались различные описанные выше критерии соответствия пространственных полей.

На рис. 1 приведено сравнение фактических и рассчитанных полей нормированных запасов воды в снежном покрове в моменты максимального снегонакопления (20 марта) для 2009–11 гг., а на рис. 2 – полей запасов продуктивной влаги в верхнем 50-сантиметровом слое почвы для засушливого 2010 г. (начала периода вегетации, его середины во время засухи и конца периода вегетации).

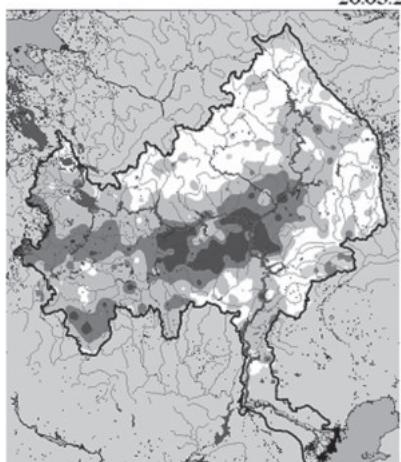
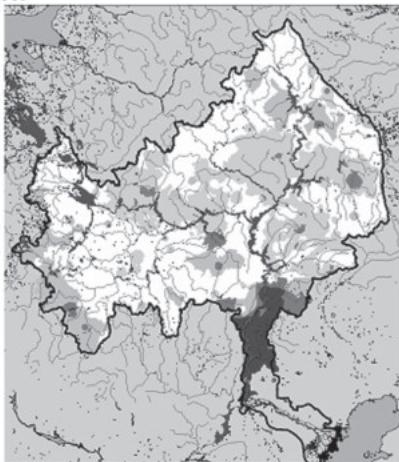
Рис. 1. Фактические (слева) и смоделированные (справа) поля нормированных запасов воды в снежном покрове в бассейне Волги на 20 марта 2009–11 гг.



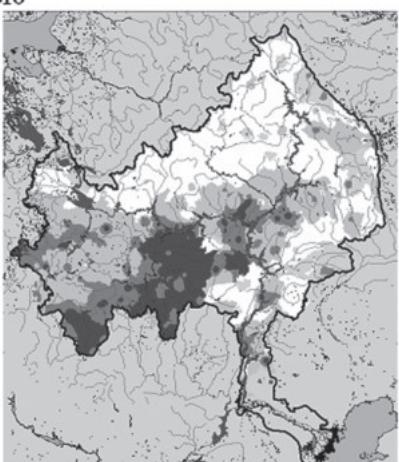
20.03.2009



20.03.2010



20.03.2011



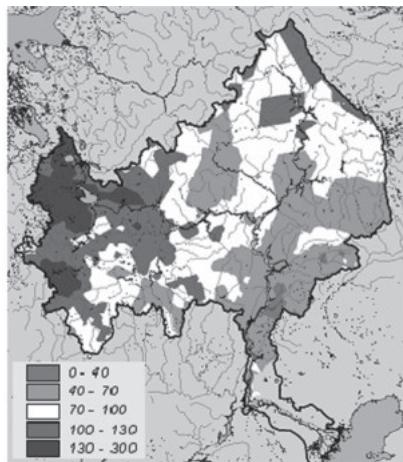
Из рис. 1 и 2 видно, что фактические и рассчитанные поля снегозапасов и влажности почвы в различных частях бассейна Волги, как правило, отличаются не более чем на одну градацию легенды рисунков. Приведённое в [13] хорошее соответствие временнй динамики рассчитанных и фактических суммарных снегозапасов за период 2001–11 гг. ( $NS=0,93$ ) и осреднённой по бассейну Волги влажности почвы ( $NS=0,90$ ) свидетельствует как о высоком качестве модели, так и о надёжности определения этих интегральных характеристик в бассейне Волги по данным снегомерных съёмок и агрометеорологических измерений. Среднемноголетние значения запасов воды в снежном покрове в бассейне Волги на дату максимального снегонакопления по данным измерений и по модельным расчётом за рассматриваемый период составили соответственно 112,8 и 112,7  $\text{km}^3$ , а среднемноголетние запасы продуктивной влаги в верхнем 50-сантиметровом слое почвы за периоды вегетации – соответственно 66 и 63 мм.

Анализ результатов расчётов показал, что предложенный подход к моделированию пространственных полей характеристик речных бассейнов на больших территориях по многим критериям дает удовлетворительные результаты.

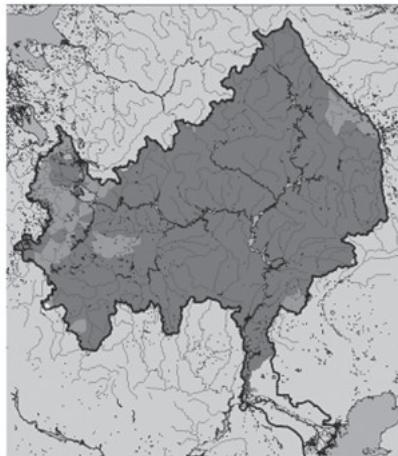
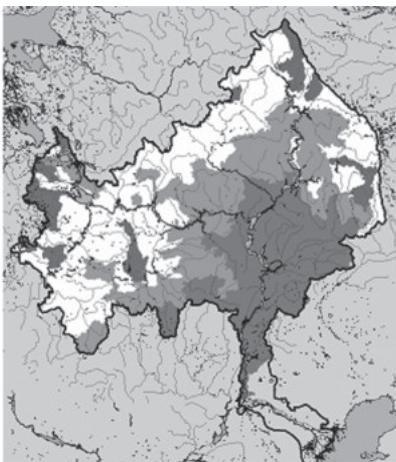
### **Предельные размеры расчётных ячеек для моделирования вертикальных потоков тепла и влаги**

Минимальные размеры расчётных пространственных ячеек при моделировании вертикальных потоков тепла и влаги в соответствии с формулировкой модели ограничены размерами так называемых презентативных элементарных областей REA или элементарных водосборов REW и по различным оценкам для разных физико-географических условий чаще всего находятся в диапазоне от 1 до 10  $\text{km}^2$  [21, 22]. Максимальные размеры расчётных ячеек в принципе могут быть заданы равными площадями исследуемых водосборов. В этом случае распределённая модель формирования стока превращается в ёмкостную модель с сосредоточенными параметрами. Однако для крупных речных бассейнов такое предположение кажется неприемлемым. Гидрологу достаточно трудно представить себе, что может быть построена, например, ёмкостная модель с

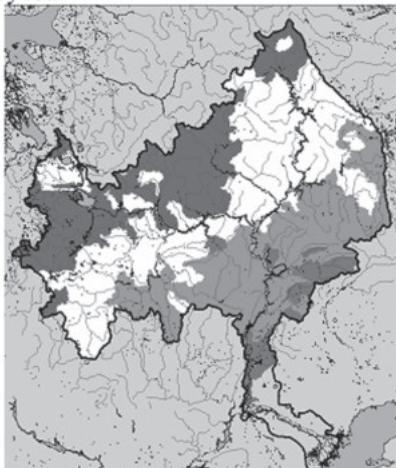
Рис. 2. Фактические (слева) и смоделированные (справа) поля продуктивной влаги в 50-сантиметровом слое почвы в бассейне Волги в 2010 г.



10 июня



10 августа



31 октября

сосредоточенными параметрами для всего бассейна Волги. Поэтому была проведена серия численных экспериментов, направленных на эмпирическое установление максимальных размеров расчётных ячеек, приемлемых с точки зрения точности расчётов относительно результатов расчётов по более мелким пространственным расчётным ячейкам. Для этого были построены поля запасов воды в снежном покрове в бассейне Волги на дату максимального снегонакопления (20 марта), рассчитанные для шести схематизаций речного бассейна с различной степенью детализации расчётных элементов. Визуальный анализ полей и объективные количественные оценки с помощью статистических критериев позволяют заключить, что заметные различия в расчётных полях и потеря точности начинают проявляться при увеличении среднего размера расчётных ячеек свыше 13 500 км<sup>2</sup>. Какими физическими факторами обусловлены эти размеры? Думается, что в первую очередь следует обратить внимание на поиск связей максимальных размеров расчётных ячеек с плотностью сети метеорологического и снегомерного мониторинга. Кроме того, на водосборах рек размером <13 500 км<sup>2</sup> ещё не так сильно проявляется зональная пространственная изменчивость почвенных, ландшафтных и климатических характеристик, на более крупных бассейнах эти факторы уже начинают играть заметную роль. В любом случае полученные результаты требуют дальнейшего осмыслиения и интерпретирования.

### **Моделирование гидрографов стока в различных пространственных масштабах**

На заключительном этапе моделирования формирования стока в речных бассейнах осуществляется расчёт трансформации по русловой системе эффективного поступления воды в речную сеть. Основная проблема корректного расчёта трансформации стока заключается в генерализации речной сети и в возможной потере так называемой первопорядковой речной сети. Суть проблемы заключается в следующем. При схематизации речного бассейна с малыми значениями расчётных пространственных шагов поступление воды со склонов (поверхностный, подповерхностный и грунтовый склоновый приток) осуществляется в детальную модельную речную сеть, по которой производится моделирование трансформации паводковых волн и гидрографов стока в каждой точке

модельной речной сети. При использовании больших расчётных ячеек воспроизводится сильно агрегированная модельная речная сеть с наиболее крупными притоками реки. Все притоки меньшего порядка (первопорядковая речная сеть по Шриву) отфильтровываются. При таких масштабах получается, что склоновое поступление воды, минуя первопорядковую речную сеть, осуществляется непосредственно в наиболее крупные притоки реки. Таким образом, на крупных масштабах в явном виде не учитываются процессы трансформации склонового поступления в первопорядковой речной сети до попадания воды в наиболее крупные притоки.

Для приближённого учёта трансформации склонового стока в «потерянной» первопорядковой речной сети в работе [13] предложены приближенные аппроксимации, полученные на основе теории подобия геоморфологического единичного гидрографа [29] с использованием наиболее характерных значений Хортоновских масштабных коэффициентов для равнинных рек.

Испытания предложенных аппроксимаций были проиллюстрированы на результатах моделирования гидрографов стока в бассейне Волги [13]. Численные эксперименты при различной степени детализации расчётных элементов показали, что эффекты добегания воды по первопорядковой сети играют здесь второстепенную роль и при различных значениях масштабируемых параметров могут незначительно сдвинуть расчётные гидрографы на 1–2 дня, что при длительном времени прохождения половодья (до нескольких месяцев) слабо влияет на различные критериальные оценки соответствия гидрографов.

### **Моделирование полей стока**

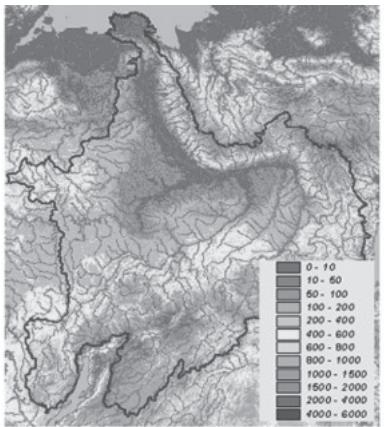
Поскольку естественный сток Волги нарушен имеющимся там каскадом водохранилищ, то возможности модельного подхода для построения среднемноголетних полей (карт) модуля стока здесь могут быть показаны лишь для частных водосборных площадей отдельных водохранилищ [1]. Ниже будут проиллюстрированы аналогичные результаты для более крупного объекта – бассейна реки Лены [14]. Необходимость в постановке такой задачи может возникнуть при разреженной сети гидрологического мониторинга и ограниченных рядах гидрометрических наблюдений, достаточных для калибровки модельных параметров, однако недостаточных для

построения вышеуказанных карт с необходимой надежностью: ситуация – характерная для северных территорий Азиатской части России.

Лена является крупнейшей рекой Восточной Сибири, её длина – 4260 км, площадь бассейна – 2490 000 км<sup>2</sup>. Восемь основных притоков Лены имеют длину более 1000 км. Физико-географические условия бассейна Лены весьма разнообразны и включают участки как низменных, так и горных территорий, что обуславливает значительную пространственно-временную изменчивость водного режима водотоков.

Модельная схематизация водосборной площади (рис. 3г) и речной сети (рис. 3в) в бассейне Лены выполнялась с использованием ГИС-комплекса Ecomag extension на основе цифровых тематических карт региона: рельефа (рис. 3а), гидрографической сети (рис. 3б), почв и ландшафтов. Для проведения гидрологических расчётов и задания граничных условий для модели в виде ежедневных полей метеорологических характеристик в пределах бассейна Лены и в непосредственной близости от его границ было задействовано около 170 метеостанций (рис. 3в) с ежесуточными метеоданными за период 1966–2009 гг. Сопоставление результатов расчётов гидрографов стока с имеющимися данными режимных гидрометрических наблюдений за этот период выполнено для 12 гидропостов (рис. 3б).

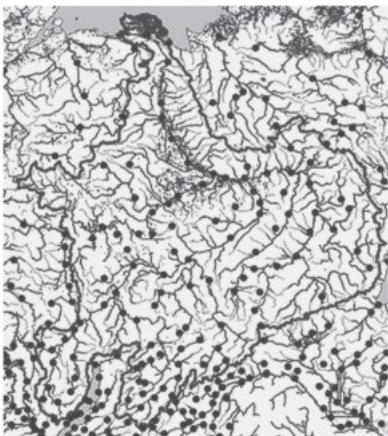
К сожалению, процедура поэтапной калибровки параметров модели ECOMAG, показавшая эффективность для бассейна Волги [13], не применима для бассейна Лены, где регулярные измерения влажности почвы осуществляются только в районе его южной границы в зоне потенциального земледелия, а мониторинговая сеть снегомерных маршрутов весьма разрежена. Поэтому здесь калибровка осуществлялась по данным наблюдений о речном стоке в различных точках рус洛вой сети реки Лены и её притоков за 2000–09 гг. (на рис. 3б эти гидропосты показаны синим цветом), валидация модели на независимом материале выполнялась по гидрографам стока за период 1966–99 гг., в том числе для гидропостов, которые не были включены в калибровочную серию (на рис. 3б они показаны красным цветом).



**а**



**б**



**в**



**г**

Рис. 3. Базовая информация и схематизация водосборной площади и речной сети в бассейне реки Лены: а – цифровая модель рельефа, б – векторная речная сеть и гидрологические посты, в – модельная речная сеть и метеостанции, г – расчётыные водосборы

Приведённые в [14] результаты расчётов показали, что более высокие оценки соответствия фактических и рассчитанных гидро-графов стока по критерию Нэша–Сатклифа получаются для гидропостов на Лене и её притоках с большими площадями водосборной площади ( $NS > 0,80$ ). Для гидропостов с относительно небольшими водосборами (в верховьях Лены, на Вилюе, Олекме, Витиме) оценки

получаются немного хуже, но тем не менее, могут быть признаны удовлетворительными (минимальное значение  $NS=0,63$ ).

Можно выделить следующие основные причины полученных отклонений фактических гидрографов от рассчитанных:

- 1. Невысокая и неравномерная степень освещенности метеорологическими данными территории бассейна.
- 2. Для относительно небольших водосборов важную роль начинают играть местные особенности формирования стока, которые в модели учитываются сочетаниями типов почв и растительности по территории. Использование для небольших водосборов имеющихся в наличии электронных карт этих характеристик на территорию РФ масштаба 1:2500 000 может оказаться недостаточным по пространственному разрешению.
- 3. Невысокая точность определения фактических расходов воды, в особенности в зимний период и в период весеннего половодья.

### **Расчеты поля среднемноголетнего модуля стока**

Среднемноголетний модуль годового стока является одной из наиболее удобных для картирования характеристикой речного стока: он зависит от физико-географических условий и ландшафтных особенностей территории и, являясь устойчивой гидроклиматической характеристикой, отражает средний уровень баланса тепла и влаги на земной поверхности. Модуль стока является одной из важнейших характеристик речного стока, используемой в гидрологических расчётах при гидротехническом проектировании.

Существует несколько способов построения карт модуля стока [4]. При наличии данных систематических наблюдений за достаточно длительный промежуток времени величина среднего стока может быть определена путём обработки данных гидрометрических наблюдений. Относительно постепенное изменение годового стока на равнинных территориях, связанное с географической зональностью, позволяет применять метод географической интерполяции путём нанесения значения стока в геометрический центр каждого изученного водосбора и проведения между ними изолиний. В условиях недостаточности гидрометрических данных используются методы, связанные с определением модуля стока по метеорологическим данным, например, путём построения зависимостей нормы годового сока от средних годовых осадков и дефицита влаж-

ности воздуха либо используют расчёты стока по уравнению водного баланса [5].

Методика построения карты среднемноголетнего модуля стока с использованием модельного подхода сводится к следующему. По многолетним рядам метеорологических данных с суточным разрешением по станциям метеорологического мониторинга строятся ежедневные поля метеохарактеристик на территорию речного бас-

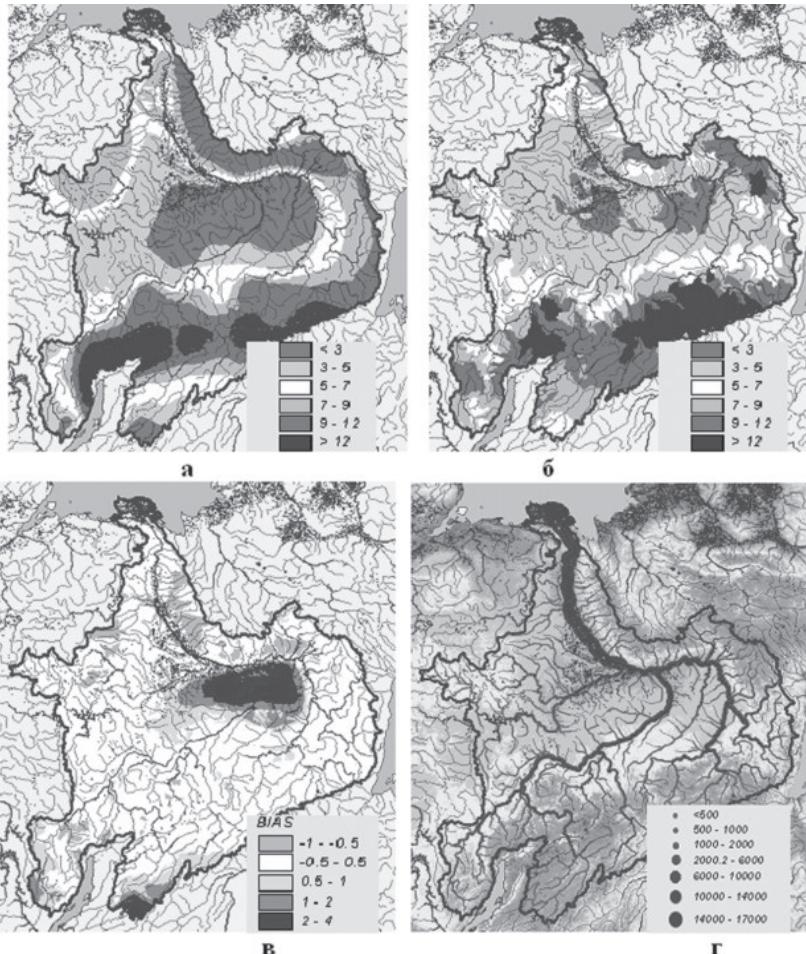


Рис. 4. Фактическая (а) и рассчитанная (б) карты модуля стока ( $\lambda / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$ ), относительные ошибки расчёта (в) и распределение рассчитанных среднемноголетних расходов воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) в речной системе (г) в бассейне р. Лены

сейна и по модели ECOMAG осуществляются расчёты гидрографов стока во всех элементах модельной речной сети (рис. 3в) за многолетний период. В узлах (центрах тяжести) расчётных водосборов (рис. 3г) выполняются расчёты эффективного водообразования за счёт поверхностного, подповерхностного и грунтового стока в локальную речную сеть и при осреднении за многолетний период рассчитываются среднемноголетние модули речного стока. Затем с использованием ГИС-технологии значения модуля стока в узлах расчётных пространственных элементов модели (расчётных водосборов) отображаются на карте речного бассейна.

На рис. 4а и 4б представлены соответственно приведённая в СНиП [15] карта среднемноголетнего модуля стока, построенная по данным гидрометрических наблюдений, и рассчитанная по модели. Сравнивая визуально карты на рис. 4а и 4б, можно отметить подобие пространственного распределения фактического и модельного полей модуля стока: в центральной части бассейна выделяется область чрезвычайно низкого модуля стока, по северо-восточной и восточной окраине бассейна, а также в северной части граничащей с бассейном озера Байкал территории отмечаются высокие значения модуля стока, на самых южных окраинах бассейна Лены опять выделяются области пониженного стока. Из анализируемых рисунков видно, что фактические и рассчитанные поля среднемноголетнего модуля стока в различных частях бассейна Лены, как правило, отличаются не более чем на одну градацию легенды рисунков. Диапазон фактических значений модуля стока в бассейне Лены колеблется в пределах от 0,5 до 25 л/(с·км<sup>2</sup>), диапазон расчётных значений – от 1,5 до 31 л/(с·км<sup>2</sup>). Осредненные по площади бассейна Лены значения фактического и рассчитанного модуля стока составили соответственно 6,95 и 6,84 л/(с·км<sup>2</sup>), а объёмы среднегодового стока Лены (интеграл по площади от поля среднемноголетнего модуля стока) – соответственно 539 и 531 км<sup>3</sup>. Интересно отметить, что, по оценкам автора, фактический среднегодовой сток реки за 1966–2002 гг. в створах Кюсюр и Столб, расположенных поблизости на придельтовом участке Лены (рис. 3б), составлял соответственно 539 и 490 км<sup>3</sup>, т.е. отличается на 10%, что в целом характеризует точность определения «фактического» годового стока в бассейне Лены.

Для более детальной оценки погрешностей расчётов поля среднемноголетнего модуля стока, на рис. 4в приведено поле относительных ошибок расчёта модуля стока, оценённых в каждой ячейке километровой сетки речного бассейна путём деления разности между фактическим и рассчитанным значениями модуля на его фактическое значение. Из этой картосхемы видно, что на большей части речного бассейна Лены относительные ошибки находятся в пределах от -0,5 до 0,5. В центральной части бассейна Лены выделяется область с наибольшими относительными погрешностями расчёта. Отчасти они объясняются чрезвычайно низкими фактическими значениями модуля стока на этой территории, так что даже незначительные погрешности расчёта обуславливают большую относительную погрешность.

Следует также отметить ещё один возможный источник ошибок, связанный с недостатком надёжных данных гидрометрических наблюдений при построении карты распределения фактического среднемноголетнего модуля стока. Так, при разработке одной из наиболее подробных карт модуля стока для территории СССР К.П. Воскресенским [4] были использованы данные по 5690 постам, при чём около половины из них имели продолжительность наблюдений до пяти лет, что явно недостаточно для получения надёжных среднемноголетних характеристик стока.

Дополнительный гидрологический анализ результатов расчётов может быть проведён средствами ГИС-технологий. В рамках единого расчёта по модели ECOMAG осуществляется моделирование гидрологического режима бассейна Лены для всех элементов модельной речной сети. На рис. 4г представлена карта распределения рассчитанных среднемноголетних расходов воды в речной системе бассейна Лены за 1966–2009 гг. Толщина линии указывает на величину расхода воды в русской сети в соответствии с легендой. С помощью курсора на ГИС легко можно проследить расходы воды в любой точке речной сети. Точность определения среднемноголетних расходов в различных точках речной сети должна быть сопоставима с точностью определения характеристик стока на отдельных гидропостах.

## Выводы

На примере бассейна Волги проиллюстрированы возможности моделирующего комплекса ECOMAG для расчётов полей характе-

ристик гидрологического цикла крупных речных бассейнов (влажности почвы, запасов воды в снежном покрове, гидрографов стока) с использованием стандартной гидрометеорологической информации, цифровых карт и баз данных водно-физических характеристик почв и ландшафтов. Показаны возможности поэтапной калибровки основных параметров пространственно-распределённой модели. Установлены минимальные и максимальные размеры расчётных ячеек для моделирования процессов формирования стока в крупных равнинных речных бассейнах Европейской части России, не противоречащих основным идеям формулировки модели ECOMAG и приемлемых с точки зрения точности расчётов.

Приведены результаты модельного подхода для построения рассчитанной по метеоданным карты среднемноголетнего модуля стока в бассейне Лены. Визуальный анализ фактического и модельного полей среднемноголетнего модуля стока в бассейне Лены показал их внешнее подобие с сохранением пространственного распределения тенденций изменения модуля по территории. Получены близкие значения диапазонов изменения модуля стока, осреднённых по площади бассейна величин фактического и рассчитанного модуля стока, а также объёмов среднегодового стока Лены. На большей части территории бассейна относительные ошибки расчёта модуля стока находятся в пределах 50%. Зона с наибольшими погрешностями приурочена к центральной части бассейна Лены с чрезвычайно низкими фактическими значениями модуля стока. Один из возможных источников ошибок может быть связан с погрешностями в построении карты фактического модуля стока, обусловленными как короткими рядами данных гидрометрических наблюдений, так и в целом недостатками, присущими интерполяционному методу определения модуля стока по расходам в руслоевой сети.

Полученные результаты могут быть полезны в как в научно-методическом плане для параметризации процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью в атмосферных и гидрологических моделях для крупных речных систем и территорий, так и в прикладном аспекте для задач планирования и управления водными ресурсами крупных речных бассейнов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беднарук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство, 2017. №7. С. 22–35.
2. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.
3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 304 с.
4. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза, Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 552с
5. Вуглинский В.С. Расчет нормы годового стока неизученных горных рек с применением уравнения водного и теплового балансов. // Тр. ГГИ, 1972. Вып. 200. С. 186–207
6. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 294 с.
7. Гороховский В.М. Эффективные параметры гидрогеологических моделей. М.: ГИДЭК, 2013. 232 с.
8. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
9. Кучмент Л.С. Проблемы выбора моделей формирования стока для решения практических задач. // В сб.: Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Т. 1, Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2015. С. 74–80.
10. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 144 с.
11. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока (физико-математические модели). М.: Наука, 1983. 216 с.
12. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1 Алгоритмы генерализации и осреднения // Вод. ресурсы. 2016. №3. С. 243–253.
13. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний // Вод. ресурсы. 2016. №5. С. 467–475.
14. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна Лены) // Метеорология и гидрология. 2017. №1. С. 78–88.
15. СНиП 2.01.14-83 «Определение расчётных гидрологических характеристик». // Госстрой СССР, М., Стройиздат, 1985. 36 с.
16. Abbott M.B., Refsgaard J.C. (Eds.) Distributed hydrological modelling // Wat. Sci. and Tech. Lib. / Kluwer Acad. Publ., 1996. V. 22. 321 p.
17. Beven K. Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models // J. Hydrol., 1989. V. 105. P. 157–172.
18. Bloschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review // Hydrol. Proc., 1995. V. 9. P. 251–290.
19. Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Yu, Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two

great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues. // Climatic Change, 2016, DOI 10.1007/s10584-016-1710-5.

20. Gelfan A., Motovilov Yu, Krylenko I., Moreido V., Zakharova E. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions. // Hydr. Sci. J., 2015. V. 60 (8). P. 1266–1285.
21. Gottschalk L., Batcharova E., Gryning S.-E., Lindroth A., Melas D., Motovilov Yu., Frech M., Heininheimo M., Samuelsson P., Grelle A., Persson T. Scale aggregation – comparison of flux estimates from NOPEX // Agricultural and Forest Meteorology, 1999. V. 98–99. P. 103–119.
22. Gottschalk L., Beldring S., Engeland K., Tallaksen L., Salthun N.R., Kolberg S., Motovilov Yu. Regional/macroscale hydrological modeling: a Scandinavian experience // Hydrol. Sci. J., 2001. V. 46(6). P. 963–982.
23. Khon V. Ch., Mokhov I. I. The hydrological regime of large river basins in Northern Eurasia in the XX–XXI centuries // Water Resources, 2012. V. 39, No. 1. P. 1–10.
24. Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches // IAHS Publ., 2013. V. 360. P. 105–112.
25. Motovilov Yu.G., L.Gottschalk, K.Engeland and A.Belokurov. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series no.105, 1999. ISBN 82-91885-04-4, ISSN 1501-6854. 88 p.
26. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K, Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // Agricultural and Forest Meteorology, 1999. V. 98–99. P. 257–277.
27. Refsgaard J.C., Abbott M.A. The role of distributed hydrological modelling in water resources management. // In: Distributed hydrological modelling / Wat. Sci. and Tech. Lib. / Eds. Abbott M.B., Refsgaard J.C. Kluwer Acad. Publ. 1996. V .22. P. 1–16.
28. Reggiani P., Schellekens J. Modelling of hydrological responses: the representative elementary watershed as an alternative blueprint for watershed modeling // Hydr. Proc., 2003. V. 17. P. 3785–3789.
29. Rodriguez-Iturbe I. The Geomorphological Unit Hydrograph // Channel Network Hydrology / Eds. Beven K., Kirkby M.J. New York, Wiley & Sons Ltd, 1993. P. 43– 68.
30. Wood E.F., Sivapalan M., Beven K.J., Band L. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrological modeling // J. Hydrol., 1988. V. 102. P. 29–47.
31. Wrede S., Seibert J., Uhlenbrook S. Distributed conceptual modelling in a Swedish lowland catchment: a multi-criteria model assessment.// Hydrol. Res., V. 44.2, 2013. P. 318–333.

## **Динамико-стохастические модели со случайными входами в приложении к задачам гидрологии речных бассейнов**

Исследования по динамико-стохастическому моделированию весеннего половодья при поддержке РФФИ (грант № 16-05-00679); исследования предсказуемости гидрологических систем выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-17-00700Г).

*А.Н. Гельфан*

За более чем полвека, прошедших с 1962 г., когда Р. Линсли и Н. Кроуфордом была создана Стенфордская модель – первая концептуальная модель формирования речного стока с сосредоточенными параметрами, численные гидрологические модели стали в экономически развитых странах основным инструментом решения исследовательских и прикладных задач гидрологии речных бассейнов. Структура моделей, их способность к усвоению теоретической информации о гидрологических процессах и пространственно распределённых данных измерений, методы оценки параметров и тестирования моделей претерпели за эти десятилетия радикальные изменения, связанные с развитием гидрологической теории и численных методов, революцией в компьютерной и измерительной технологиях. Уже к началу 2000-х гг. количество численных гидрологических моделей разной сложности и области применения исчислялось многими десятками (перечень наиболее широко используемых, приведённый в [48], включает 71 модель). Среди них – физико-математические модели с распределёнными параметрами, разрабатываемые, прежде всего, для исследования физических механизмов поведения гидрологических систем (как, например, Система моделей гидрологического цикла ИВПРАН [7, 13], IHDM [41], SHE [21], ECOMAG [42], CRHM [44]), и концептуальные модели, используемые преимущественно в оперативной практике отдельных стран (например, HBV в Скандинавских странах, ARNO и TOPIKAPI в Италии, UBC и WATFLOOD в Канаде, Xinanjiang в Китае, Модель ГМЦ в РФ).

Резервы повышения эффективности гидрологических моделей – детерминистических по входящим в их структуру уравнениям и зависимостям, связываются, как правило, с возможностями учёта более подробной детерминистической информации, как то: уточнение параметризации гидрологических процессов, привлечение

дополнительных источников данных, увеличение их пространственного и временного разрешения, уточнение связей параметров модели с характеристиками водосбора и т.п. Вместе с тем, многие источники ошибок модели имеют вероятностную природу, и их влияние не может быть полностью нивелировано учётом детерминистической информации; иными словами, сколь совершенная детерминистическая модель, обеспеченная всеми необходимыми и точными измерениями, ни использовалась бы для описания гидрологических процессов, всегда остаются пространственные и временные масштабы, на которых сохраняется неопределённость, не описываемая этой детерминистической моделью.

К основным источникам неопределённости гидрологической модели относятся: ограниченность временных рядов метеорологических измерений, которые используются для идентификации, калибровки и тестирования модели, недостаток данных для задания граничных условий на пространственных масштабах, не описываемых имеющимися измерениями, дефицит данных для задания начальных условий и параметров модели, ошибки измерений.

Учёт различных источников неопределённости, присутствующих в детерминистической модели, достигается включением в неё соответствующей вероятностной информации. Идея о том, что недостаток физической, детерминистической информации о гидрометеорологических величинах и свойствах водосбора может быть восполнен, в какой-то мере, учётом в модели информации об их вероятностных свойствах, давно используется в гидрологии (примеры см. [1]). Естественно, с усложнением структуры детерминистической модели, её требований к составу и пространственно-временному разрешению исходных данных растёт и число источников неопределённости. С другой стороны, именно в способности модели к адекватному усвоению имеющейся априорной информации, не только детерминистической, но и вероятностной, содержится резерв расширения её возможностей как инструмента научных исследований и решения прикладных задач. Разработка модели, основанной на детерминистическом описании гидрологических процессов с учётом вероятностной информации о неопределённости используемых моделью исходных данных, составляет предмет динамико-стохастического моделирования [11, 1].

Одним из перспективных и интенсивно развивающихся направлений в области динамико-стохастического моделирования является разработка численных динамико-стохастических моделей со случайными входами, учитывающими вероятностную природу метеорологических воздействий на речной водосбор. В структуре таких моделей объединены два компонента: детерминистическая гидрологическая модель и стохастическая модель временных рядов метеорологических величин (т.н. «стохастический генератор погоды»), задаваемых на входе детерминистической модели. Методология построения численных динамико-стохастических моделей со случайными входами была обоснована в начале 1980-х гг. Л.С. Кучментом [13], и её развитие описано во многих совместных работах в течение последующих без малого 30 лет [8, 9, 10, 11, 12, 32, 33, 34, 36]. В этих работах представлены динамико-стохастические модели формирования дождевого и талого стока, предложены методы построения стохастических генераторов погоды для гидрологических приложений, разработаны экономичные алгоритмы численной реализации моделей при большом числе статистических испытаний, на примере нескольких речных бассейнов показаны возможности применения динамико-стохастических моделей для решения актуальных задач: построения физически обоснованной оценки характеристик речного стока малой обеспеченности, долгосрочного вероятностного прогноза весеннего половодья. Мировой опыт развития методов динамико-стохастического моделирования в гидрологии речных бассейнов изложен во многих десятках публикаций (их обзор и перечень существующих динамико-стохастических моделей со случайными входами дан в книге [1]).

В настоящей статье представлены некоторые новые результаты этой области, полученные за последние годы в лаборатории гидрологии речных бассейнов ИВП РАН. Описаны три динамико-стохастические модели со случайными входами: (1) модель формирования притока воды в бассейне Чебоксарского водохранилища и её применение для ансамблевого долгосрочного прогноза незарегулированного притока воды в водохранилище; (2) модель формирования снежного покрова и её применение для описания макромасштабной структуры поля снежного покрова и (3) модель неизотермического влагопереноса в мерзлой почве и её применение для оценки

предела предсказуемости изменений запасов почвенной влаги. В статье использованы материалы совместных публикаций [2, 3, 30, 31].

**Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды  
в чебоксарское водохранилище на основе динамико-  
стохастической модели формирования стока**

Усиление требований к экономической эффективности и безопасности эксплуатации водноресурсных систем обуславливает необходимость совершенствования существующих методов долгосрочных прогнозов речного стока, повышения их точности, заблаговременности и информационного содержания. Возможности модернизации существующих оперативных методик (в большинстве своём, эмпирических, разработанных в середине прошлого века) весьма ограничены, прежде всего из-за нарушений однородности рядов речного стока и его предикторов. Эти нарушения могут быть связаны с сокращением сети гидрологических наблюдений (при мерно на 30% за последние 30 лет [25]), переходом на новые измерительные технологии, изменением водного режима рек в связи с изменением климата и хозяйственной деятельности. Современной методической базой модернизации методов долгосрочных гидрологических прогнозов служат модели формирования речного стока, описывающие разнообразие гидрологических процессов в речном бассейне с использованием имеющихся данных гидрометеорологических наблюдений, информации о природных особенностях бассейна. Применение таких моделей позволяет получить прогноз не только объёма и максимального расхода стока, но и других характеристик водного режима, что даёт дополнительную информацию пользователям прогноза и создаёт резервы повышения эффективности принятия решений. Дополнительные возможности расширения информационного содержания прогнозов связаны с переходом от традиционных детерминистических к ансамблевым прогнозам, результаты которых могут быть представлены в вероятностной форме с учётом различных источников ошибок прогнозов. Совершенствование «методов выпуска гидрометеорологических долгосрочных прогнозов (месяц, сезон), а также прогнозов экстремальных гидрометеорологических явлений и характеристик, обладающих большой степенью неопределенности, в вероятностной форме»

признано российским профессиональным сообществом одной из приоритетных задач научных гидрологических исследований [18]. В отечественной практике методические основы ансамблевых долгосрочных прогнозов характеристик весеннего половодья на основе динамико-стохастических моделей его формирования впервые разработаны в Институте водных проблем РАН под руководством Кучмента и опубликованы в совместных работах [9, 10]. Исследования, описанные ниже, являются развитием методологии, представленной в указанных публикациях

### **Модель формирования притока воды в Чебоксарское водохранилище: результаты тестирования.**

Нами использовалась физико-математическая модель формирования стока с распределёнными параметрами ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics), созданная Ю.Г. Мотовиловым [42, 15] на базе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов Института водных проблем РАН [13]. Модель описывает процессы формирования и таяния снежного покрова, гидротермические процессы в почве при её промерзании и оттаивании, инфильтрации воды в мерзлую и незамерзшую почву, испарения и эвапотранспирации, стекания воды по поверхности водосбора, подповерхностного и грунтового стока, движения воды в речной системе. Многочисленные примеры успешных испытаний модели ECOMAG, по данным наблюдений в речных бассейнах площадью от десятков до миллионов км<sup>2</sup>, расположенных в разных климатических условиях, даны, например, в библиографии к статье [30].

Для схематизации водосбора Чебоксарского водохранилища и задания параметров модели использовались цифровые модели рельефа с разрешением 1 км и серии цифровых тематических карт (почвенная, ландшафтная и т.д.). В качестве граничных условий задавались ряды среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, интенсивности осадков по данным наблюдений на 157 метеорологических станциях с 1.01.1982 по 31.07.2016.

Модель калибровалась и проверялась по данным о боковом притоке воды к Чебоксарскому водохранилищу за 35 лет – с начала его функционирования в 1982 г. по 2016 г. Калибровка модели производилась по фактическим данным о расходах воды за 2000–14 гг.; про-

верка модели на независимых данных производилась для периода 1982–99 гг., а также за 2015 и 2016 гг.

Систематическая относительная погрешность расчёта ежедневного притока воды в водохранилище за 35-летний период составила 1%, среднеквадратическая погрешность расчётов составила порядка  $870 \text{ м}^3/\text{с}$  при стандартном отклонении фактических величин  $2109 \text{ м}^3/\text{с}$ . Рассчитанные ежедневные расходы воды за весь период сравниваются с фактическими величинами на рис. 1. Полученные удовлетворительные результаты апробации модели по данным гидрометеорологических наблюдений дают основание использовать её в качестве детерминистического компонента разрабатываемой динамико-стохастической модели.

### **Стохастическая модель гидрометеорологических воздействий на водосбор («стохастический генератор погоды»).**

«Стохастический генератор погоды» – принятый в климатологии термин для обозначения комплекса стохастических моделей, позволяющих получать методом Монте-Карло многолетние искусственные ряды метеорологических переменных суточного разрешения, статистические свойства которых и во времени, и по пространству близки к свойствам метеорологических рядов наблюдения.

Нами был разработан стохастический генератор погоды MSFR\_WG (Multi-Site FRagment-based stochastic Weather Generator) [31], предназначенный для моделирования методом Монте-Карло многолетних временных рядов «входных» величин гидрологической модели (среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, интенсивности осадков) с учётом взаимной временной и пространственной статистической связности между ними. В основу генератора погоды положен метод пространственных фрагментов, представляющий собой модификацию метода фрагментов Г.Г. Сванидзе [19]. Ниже коротко изложен алгоритм разработанного метода.

Рассчитываются нормализованные поля (пространственные фрагменты) среднесуточных значений метеорологических переменных по данным наблюдений на 157 станциях за 51 год (1966–2016 гг.). Пространственные фрагменты строятся для каждого года наблюдений путём нормирования метеорологических переменных полей

Таблица 1

**Список параметров модели MSFR\_WG и их значения для водосбора Чебоксарского водохранилища (за 1966–2016)**

№ п/п	Название параметра	Значение для рассматриваемой территории
1	Среднемноголетняя, средняя по площади температура воздуха, °C	4,58
2	Среднемноголетняя, средняя по площади интенсивность осадков, мм/сут	1,52
3	Среднемноголетний, средний по площади дефицит влажности воздуха, мб	3,15
4	Стандартное отклонение средней по площади среднегодовой температуры воздуха, °C	0,99
5	Стандартное отклонение средней по площади среднегодовой интенсивности осадков, мм/сут	0,18
6	Стандартное отклонение среднего по площади среднегодового дефицита влажности воздуха, мб	0,69
7	Коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади осадков и температуры воздуха	Статистически незначимый
8	Коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади осадков и дефицита влажности воздуха	-0,51
9	Коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади температуры и дефицита влажности воздуха	Статистически незначимый

наблюдения на их среднее значение по пространству в рассматриваемом году.

Следующий шаг – моделирование методом Монте-Карло многолетних искусственных последовательностей средних по пространству среднегодовых значений искомых метеорологических переменных с учётом их взаимной корреляции.

Заключительный шаг алгоритма – расчёт полей среднесуточных значений метеорологических переменных путём умножения смоделированных среднегодовых, средних по площади значений каждой метеорологической переменной на соответствующий пространственный фрагмент. Фрагмент выбирался из созданного ранее набора фрагментов методом латинского гиперкуба.

Метод пространственных фрагментов – малопараметрический по сравнению с методами, обычно применяемыми в пространственно распределённых генераторах погоды и основанными на использовании аналитических пространственных корреляционных функ-

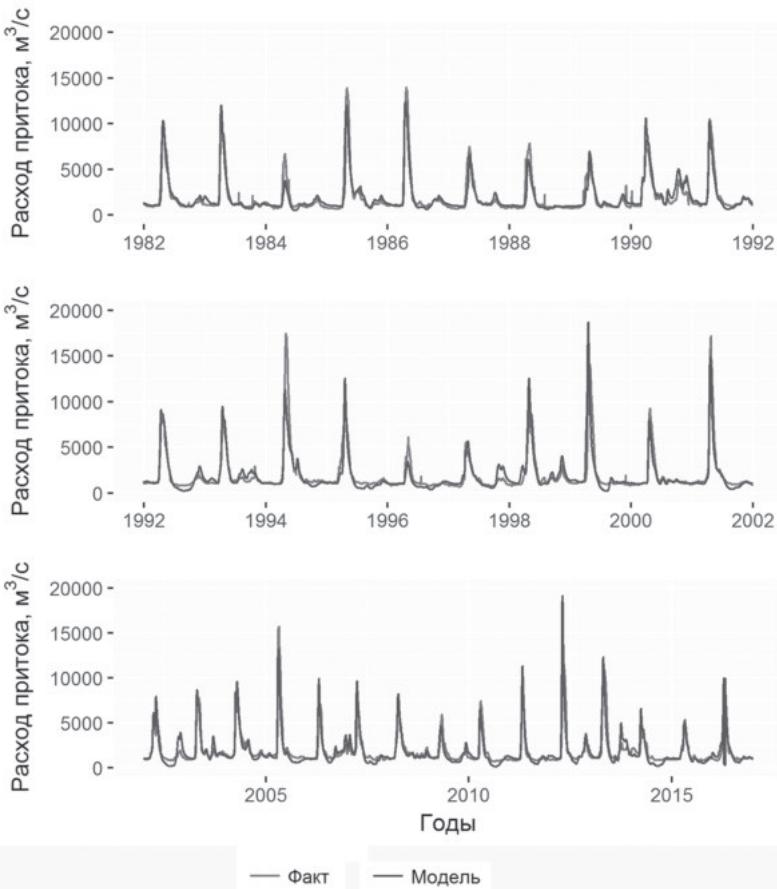


Рис. 1. Рассчитанные (синяя линия) и фактические (красная линия) расходы бокового притока воды к Чебоксарскому водохранилищу

ций. Разработанный генератор погоды имеет всего 9 параметров, перечисленных в табл. 1. Здесь же даны оценки параметров, определённые методом моментов по данным многолетних метеорологических наблюдений в рассматриваемом бассейне.

С помощью модели MSFR\_WG методом Монте-Карло были сформированы соответствующие современному климату искусственные ряды среднесуточных значений интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха длиной 1000 лет для каждой станции на рассматриваемой территории. Для проверки качества разрабо-

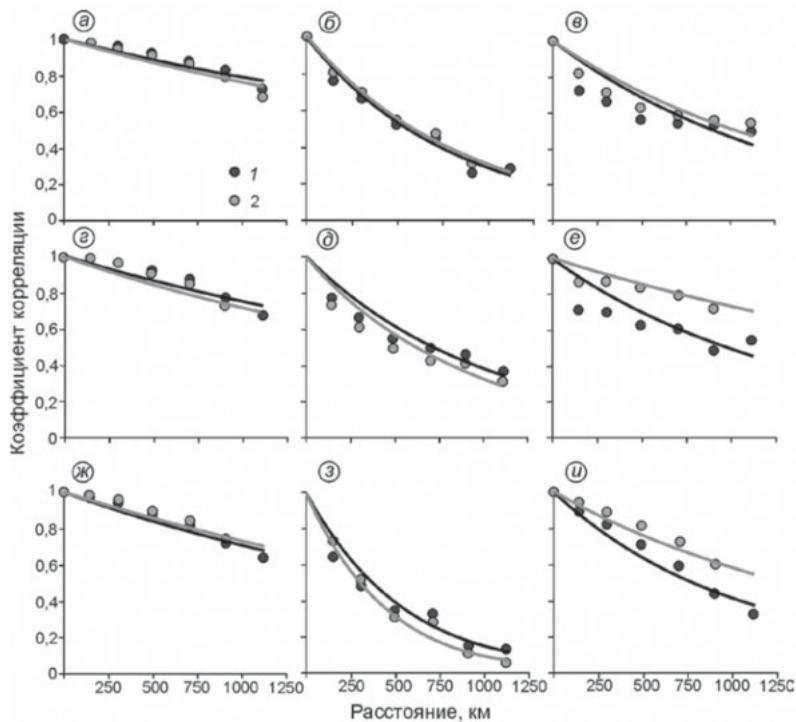


Рис. 2. Пространственные корреляционные функции среднемесячных значений температуры воздуха (левая колонка), интенсивности осадков (средняя колонка) и дефицита влажности воздуха (правая колонка) за январь (а–в), февраль (г–е) и март (ж–и), определённые по фактическим (1) и рассчитанным (2) данным. Линиями показаны аппроксимирующие экспоненциальные функции

такого генератора погоды сравнивались статистические характеристики, определённые по фактическим и искусственным рядам метеорологических переменных: средние многолетние величины за год, месяц и сутки; стандартные отклонения среднегодовых и среднемесячных величин; корреляции между среднегодовыми (среднемесячными) значениями на отдельной станции и соответствующими значениями на других станциях; пространственные корреляционные функции значений осадков, температуры и влажности воздуха, осреднённых за разные временные интервалы (год, месяц, сутки).

Подробно результаты проверки разработанного генератора погоды приведены в [14]. Показано, что статистики искусственных

рядов искомых метеорологических переменных оказались в пределах стандартного отклонения оценок соответствующих характеристик по рядам наблюдений за этими метеорологическими переменными на рассматриваемой территории. Важно подчеркнуть, что этот вывод оказался справедлив для разных временных осреднений искомых переменных – от суток до года. На рис. 2 в качестве примера показаны пространственные корреляционные функции среднемесячных значений метеорологических переменных для января–марта.

Удовлетворительные результаты проверки стохастического генератора погоды MSFR\_WG позволяют использовать его для задания пространственно распределённых случайных входов в описанную выше детерминистическую гидрологическую модель.

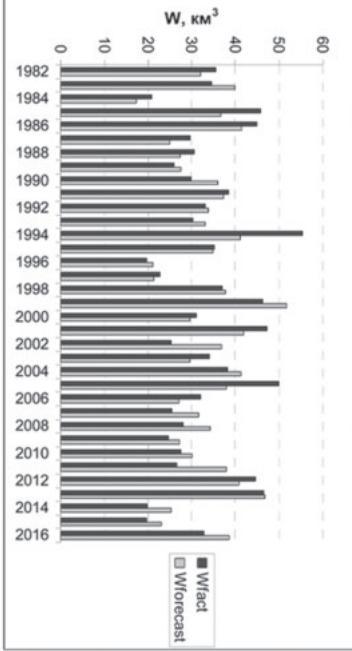
### **Схема долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу и результаты её верификации**

Схема долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищу с использованием описанной динамико-стохастической модели состоит в следующем:

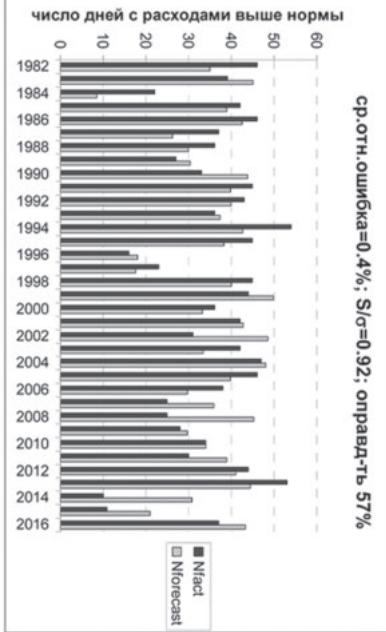
1. По данным метеорологических наблюдений за осенне-зимний период с помощью гидрологической модели рассчитываются характеристики водосбора (запасы воды в снежном покрове, глубина промерзания и влажность почвы, запас воды в русловой сети и др.) на дату выпуска прогноза (например, 1 марта).
2. С помощью генератора погоды строится ансамбль из 1000 искусственных сценариев погоды за период заблаговременности прогноза (3–4 месяца). Каждый сценарий представляет собой набор полей температуры и влажности воздуха, интенсивности осадков за каждые сутки периода заблаговременности прогноза.
3. По смоделированным начальным условиям на дату выпуска прогноза и сценариям погоды за период заблаговременности прогноза, задаваемым на входе гидрологической модели, рассчитывается ансамбль из 1000 прогнозируемых гидрографов притока воды к

Рис. 3. Детерминистический (средний по ансамблю) проверочный прогноз объёма (слева вверху), и максимального расхода (справа вверху) притока воды к водохранилищу, продолжительности периодов разной водности (внизу) за 2-й квартал. Синие столбцы – фактические значения, серые – прогноз

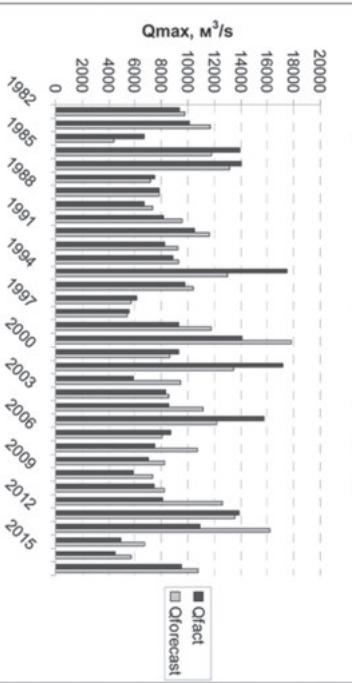
ср.отн.ошибка=0.5%;  $S/\sigma=0.57$ ; оправд-ть 81%



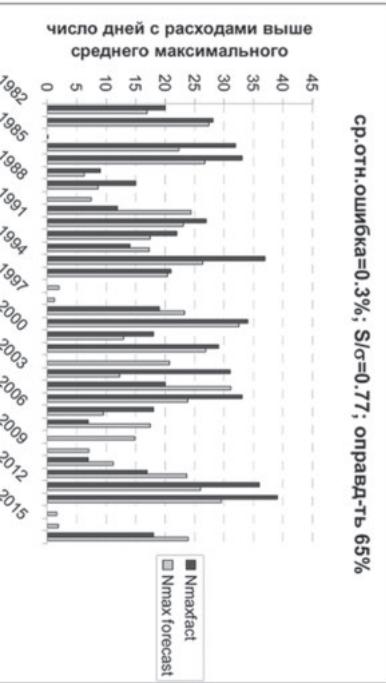
ср.отн.ошибка=0.4%;  $S/\sigma=0.92$ ; оправд-ть 57%



ср.отн.ошибка=6%;  $S/\sigma=0.66$ ; оправд-ть 65%



ср.отн.ошибка=0.3%;  $S/\sigma=0.77$ ; оправд-ть 65%



водохранилищу для каждого из 35 сезонов проверочного ряда (1982–2016 гг.).

4. По полученным ансамблям характеристик притока, определённых по рассчитанным гидрографам, строятся функции распределения вероятности указанных характеристик для каждого из 35 сезонов проверочного ряда. Прогнозировались следующие характеристики притока: объём и максимальный расход, а также продолжительности двух периодов высокой водности (с расходом воды выше нормы,  $4250 \text{ м}^3/\text{с}$ , и выше среднего максимального расхода,  $9355 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

На рис. 3 в качестве примера показан прогноз притока за второй квартал, представленный в детерминистической форме, т.е. в виде средних по ансамблям из 1000 значений прогнозируемых величин. В поле диаграмм приведены величины относительной ошибки прогноза, отношения  $S/\sigma$  стандартного отклонения ошибок прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины, а также значения оправдываемости прогнозов ([17]).

Детерминистический прогноз характеристик притока воды к водохранилищу может считаться удовлетворительным для объёма и максимального расхода притока [17], а также для числа дней с расходом притока выше среднего максимального. Число дней с расходом притока выше нормы прогнозировалось с меньшей точностью.

Результаты ансамблевых прогнозов гидрографов весеннего стока могут быть представлены в вероятностной форме, что даёт возможность оценить риск принятия решений и выстроить на этом основании более гибкую систему управления водноресурсной системой, чем в случае детерминистического (однозначного) прогноза. Наиболее распространённое и информативное представление вероятностного прогноза речного стока заключается в построении интегральной функции распределения вероятности прогнозируемой величины. На сравнении интегральных функций распределений вероятности прогнозируемой и наблюдённой величин стока построены методы верификации вероятностных прогнозов, широко применяемые в оперативной метеорологии, и со сравнительно недавних пор, используемые для оценки качества ансамблевых гидрологических прогнозов (см., например, [9]).

Ординаты интегрального распределения вероятности прогнозируемой характеристики стока  $y_{\text{пр}}$  для  $j$ -го сезона из проверочного ряда рассчитываются как

$$F_m(j) = \sum_{i=1}^m f_i(j), \quad m=1, \dots, M; \quad j=1, \dots, N,$$

где  $M$  – число интервалов вероятностей, на которое разбивается отрезок  $[0;1]$ ;  $N$  – число проверочных прогнозов;  $f_i$  – частота попадания прогнозируемой величины в заданный интервал.

Ординаты интегрального распределения вероятности фактической характеристики стока  $y_{\text{факт}}$  для  $j$ -го сезона из проверочного ряда оцениваются как:

$$O_m(j) = \sum_{i=1}^m o_i, \quad m=1, \dots, M; \quad j=1, \dots, N,$$

где  $o_i=1$  в интервале, куда попала наблюдённая величина, и  $o_i=0$  в остальных интервалах.

На рис. 4 в качестве примера вероятностного представления ансамблевого прогноза показаны функции распределения вероятности прогнозируемых объёмов притока воды к водохранилищу, построенные по рассчитанным ансамблям для каждого года проверочного периода, в сравнении с функциями распределения соответствующих фактических объёмов притока.

Важно подчеркнуть отличие описанной схемы ансамблевого прогноза, в которой используются смоделированные метеорологические сценарии за период заблаговременности прогноза, от распространенной в США схемы ESP (Ensemble Streamflow Prediction) [43]. Последняя основана на предположении, что фактические сценарии погоды, наблюдавшиеся ранее за период заблаговременности прогноза, репрезентативны для использования их в качестве ансамбля метеорологических условий после даты выпуска прогноза [27]. Рассчитанный с помощью гидрологической модели ансамбль прогнозируемых характеристик стока используется для построения распределения вероятности этих характеристик и выпуска прогноза в вероятностной форме. Вместе с тем, задаваемые на входе модели фактические метеорологические данные далеко не исчерпывают возможных сценариев погоды за период заблаговременности; желательно учесть не только наблюдавшуюся ранее погоду, но и возможные метеорологические условия, которые могут

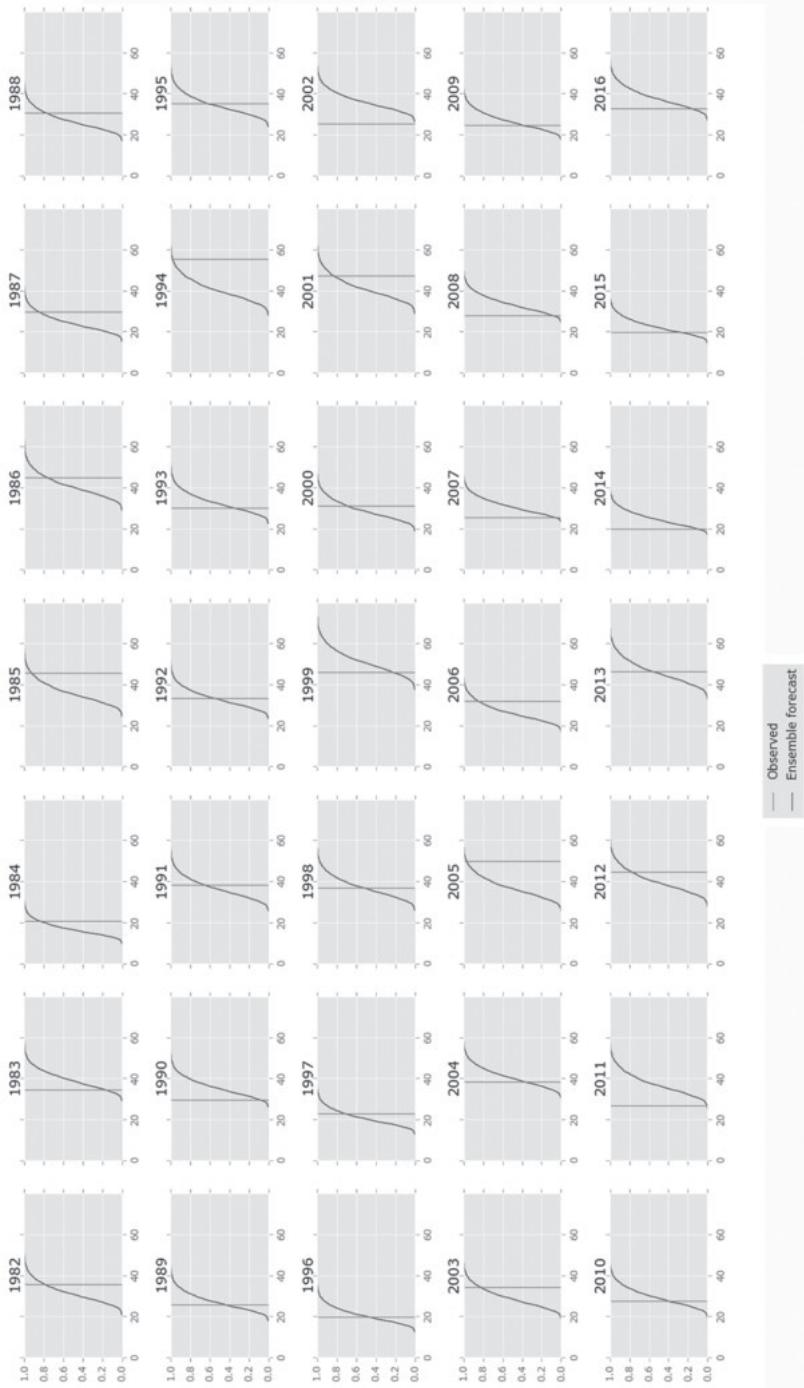


Рис. 4. Интегральные распределения вероятности притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2-й квартал (синие кривые) в сравнении с распределением вероятности фактических значений объема притока (красные кривые).

привести к формированию редких по масштабу половодий. Представление о вероятности такого половодья может играть важную роль при принятии решений. Кроме того, поскольку размер ансамбля прогнозируемых величин стока ограничен числом наблюдённых сценариев погоды за период заблаговременности прогноза и обычно не превышает нескольких десятков членов, выборочная изменчивость кривых распределения вероятности прогнозируемых величин может стать слишком высокой. Это в свою очередь, влияет на устойчивость критериев качества вероятностного прогноза и может создать трудности при интерпретации его результатов. Обе проблемы, возникающие из-за небольшого, как правило, количества наблюдённых сценариев погоды, используемых в схеме ESP, могут быть решены путём применения предлагаемой схемы прогноза с помощью динамико-стохастической модели. В качестве иллюстрации, на рис. 5 показаны 95%-е доверительные интервалы кривых распределения вероятности нескольких проверочных прогнозов притока воды в Чебоксарское водохранилище, рассчитанных по схеме ESP и по динамико-стохастической модели. (Доверительные интервалы рассчитаны с использованием неравенства Дворецкого-Кифера-Волфовича [40]). Рисунок показывает намного большую неопределенность кривой распределения прогнозов, рассчитанных по схеме ESP при использовании сценариев погоды за 51 год наблюдений, по сравнению с распределением прогнозов, рассчитанных по модели.

В заключение перечислим основные особенности предлагаемой динамико-стохастической схемы долгосрочного ансамблевого прогноза в сравнении с традиционно используемыми в отечественной оперативной практике:

1. Начальные (на дату выпуска прогноза) условия в речном бассейне (запасы воды в снеге и в русловой сети, влажность и промерзание почвы) рассчитываются по данным стандартных метеорологических наблюдений. Это существенное достоинство методики в условиях сокращения сети снегомерных наблюдений и наблюдений за промерзанием почвы, а также отсутствием данных о влажности почвы в зимнее время.

2. Прогнозируется набор характеристик водного режима, включая объём и максимальный расход весеннего стока, продолжитель-

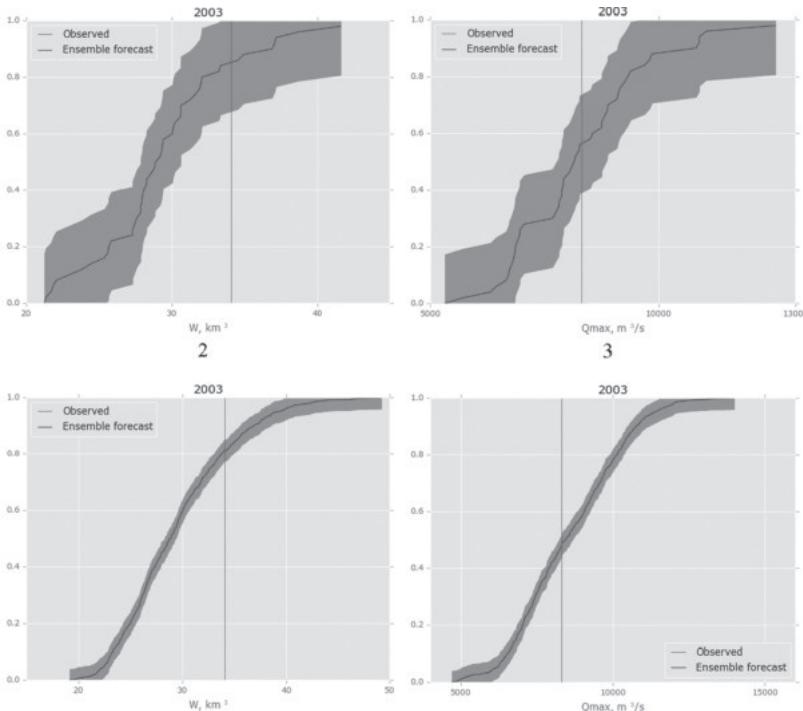


Рис. 5. Вероятностный проверочный прогноз объёма (слева) и максимального расхода (справа) притока воды в Чебоксарское водохранилище за 2-й квартал 2003 г. Вверху – прогноз по схеме ESP, внизу – по динамико-стохастической модели. Серой полосой показан 95%-й доверительный интервал ординат кривой распределения

ности периодов разной водности, что позволяет существенно расширить информационное содержание выпускаемых прогнозов.

3. Имеется возможность выпуска прогноза и в детерминистической, и в вероятностной формах в рамках одной методики.

4. На единой методической основе даётся прогноз водного режима в разные сезоны года. Существующие методики долгосрочного гидрологического прогноза различаются в зависимости от прогнозируемой фазы водного режима (весеннего половодья, летней межени, зимнего стока) расчётыми схемами, требованиями к исходной информации, предикторами и точностью их оценки по данным измерений, набором параметров и т.п.

## **Динамико-стохастическое моделирование полей характеристик снежного покрова на равнинном водосборе**

Макромасштабные изменения характеристик снежного покрова, обусловленные физико-географической и климатической зональностью, проявляются для равнинных территорий на расстояниях от десятков до сотен километров [39]. Пространственная изменчивость характеристик снежного покрова и особенности их корреляционной структуры на макромасштабе играют важную роль в процессах энерго- и массообмена поверхности суши с атмосферой в высоких широтах. В большинстве современных глобальных моделей климата эта изменчивость учитывается как подсеточная для уточнения описания атмосферных процессов. Существенное влияние макромасштабная изменчивость снежного покрова оказывает на процессы гидрологического цикла суши, в частности, на формирование весенне-летнего половодья, определяющего водный режим крупнейших рек Евразии.

Существующие методы исследования вероятностных свойств макромасштабной структуры снежного покрова основаны, в большинстве своём, на эмпирическом анализе имеющихся данных снегомерных наблюдений. Значительные достижения в этой области связаны с применением методов объективного анализа метеорологических полей, которые были развиты, прежде всего, в работах отечественных метеорологов (например, [6]). Вместе с тем, эмпирические оценки макромасштабной изменчивости и корреляционной структуры поля снежного покрова содержат существенную неопределённость, обусловленную малой продолжительностью рядов наблюдений и их нестационарностью, связанной с изменениями условий формирования снежного покрова, в том числе вследствие происходящих изменений климата, модернизации измерительных технологий, изменения частоты и состава наблюдений. Перспектива уточнения свойств пространственной структуры поля снежного покрова связана с возможностью их описания по данным о полях метеорологических переменных и характеристиках подстилающей поверхности. Указанная возможность может быть реализована путём построения динамико-стохастической модели формирования снежного покрова с пространственно распределёнными случайными входами. Ниже представлены результаты применения такой

модели, разработанной в ИВП РАН [3], для описания пространственной структуры поля снежного покрова в бассейне Чебоксарского водохранилища.

Детерминистический компонент разработанной динамико-стохастической модели – однослойная модель формирования снежного покрова, предложенная Ю.Г. Мотовиловым [16] и многократно использовавшаяся для расчётов формирования талого стока на речных водосборах, расположенных в разных природных условиях (см. обзор публикаций в книге [1]). Модель рассчитывает изменения высоты и плотности снежного покрова в процессе его формирования и таяния с учётом поступления твёрдых и жидких осадков, фазовых переходов в толще снега, задержания талой воды, уплотнения снега под действием собственного веса. Второй компонент динамико-стохастической модели – стохастический генератор погоды MSFR\_WG – описан в предыдущем разделе.

Анализ вероятностной структуры поля снежного покрова по данным снегомерных наблюдений в бассейне Чебоксарского водохранилища.

В работах [23, 26, 35] показано, что пространственные структурные функции запаса воды в снеге и высоты снежного покрова, построенные по данным измерений в разных физико-географических условиях, могут быть описаны степенной функцией:

$$\gamma \sim h^\alpha \quad (0 < \alpha < 2) \quad (1)$$

где  $\gamma(h) = \frac{1}{2} \sigma^2 [\varepsilon(h)]$ ,  $\sigma^2[\cdot]$  – дисперсия,  $\varepsilon(x, x+h) = [S(x) - S(x+h)] = \varepsilon(h)$ ,  $S = S(x)$  – искомая характеристика снежного покрова,  $x$  – пространственная координата

Случайное поле со степенной структурной функцией (1) является стохастическим фракталом и обладает свойством самоподобия. Фрактальная размерность  $D_2$  определяется по показателю степени структурной функции  $\alpha$ , как [20]

$$D_2 = 3 - 0,5\alpha. \quad (2)$$

В [35] обобщены данные о структурных функциях полей снегозапасов на территориях с линейными размерами от 3 до 100 км и показано, что величины фрактальной размерности для этих данных составляют  $D_2 = 2,6 \div 2,8$ . Близкие результаты ( $D_2 = 2,66 \div 2,92$ ) получены для полей максимальных снегозапасов по многолетним данным

снегомерных наблюдений в пределах 6 регионов площадью от 20 тыс. до 100 тыс. км<sup>2</sup>, расположенных в разных частях Европейской России и в Восточной Сибири. Как показано в [35], принятие гипотезы самоподобия поля снежного покрова позволяет рассчитать дисперсию снегозапасов на подсеточных областях гидрологических моделей с распределёнными параметрами.

Структурные функции среднемесячных (за январь, февраль и март) значений снегозапасов и высоты снега были построены по данным снегомерных наблюдений за 46 лет (1966–2011) на 15-ти метеорологических станциях, расположенных в бассейне Чебоксарского водохранилища. Показано, что для обеих характеристик снежного покрова структурные функции аппроксимируются степенными зависимостями, т.е. дисперсия разности этих характеристик в разных точках поля растёт с увеличением расстояния между этими точками на всём диапазоне расстояний в пределах рассматриваемой территории. При этом изменения показателя степени  $\alpha$  от месяца к месяцу незначительны: 0,48÷0,65 для снегозапасов и 0,86÷1,04 для высоты снега. Соответствующие значения фрактальных размерностей, рассчитанные по формуле (2),  $D_{SWE}(\text{факт})=2,76\div2,67$ , а для поля высоты снежного покрова  $D_{\text{depth}}(\text{факт})=2,57\div2,48$ . В целом, полученные результаты соответствуют высказывавшимся ранее предположениям о фрактальных свойствах полей характеристик снежного покрова в отдельных регионах. Разработанная динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова предназначена для описания этих свойств.

#### **Результаты динамико-стохастического моделирования корреляционной структуры поля снежного покрова.**

С помощью динамико-стохастической модели формирования снежного покрова со случайными пространственно распределёнными входами были смоделированы соответствующие современному климату поля среднесуточных значений метеорологических переменных длиной 1000 лет и рассчитаны соответствующие поля среднесуточных значений характеристик снежного покрова (запаса воды в снеге и его высоты). Качество моделирования оценивалось с помощью двух проверочных процедур.

Вначале по смоделированным рядам для каждой метеорологической станции оценивались безусловные средние значения харак-

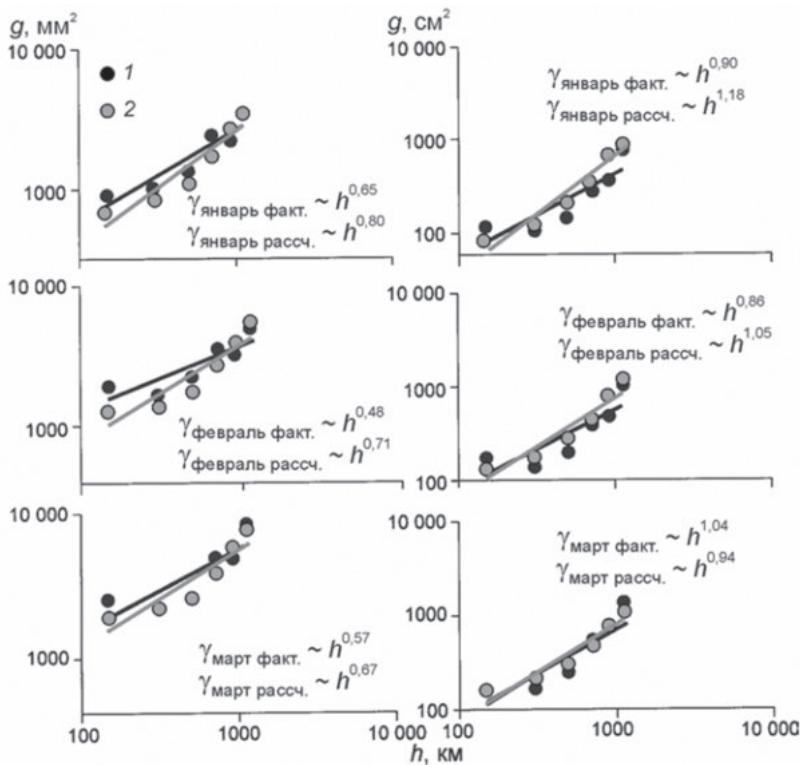


Рис. 6. Структурные функции среднемесячных величин снегозапасов (слева) и высоты снежного покрова (справа), рассчитанные по данным наблюдений (чёрные точки) и по динамико-стохастической модели (серые точки)

теристик снежного покрова, которые сравнивались с соответствующими средними, оценёнными по имеющимся рядам снегомерных наблюдений на этих станциях. Оценивались средние значения среднемесячных и максимальных за месяц характеристик для четырёх месяцев (с декабря по март) устойчивого залегания снежного покрова на рассматриваемой территории.

Среднеквадратическая ошибка расчёта снегозапасов, как средних, так и максимальных, не превышает 11 мм за все рассматриваемые месяцы. Наибольшая систематическая погрешность расчёта снегозапасов была выявлена в декабре – до 7 мм. В другие месяцы абсолютные погрешности снижаются и не превышают 3% от соответствующих средних значений. Погрешность расчёта высоты снега

за все месяцы не превышает  $-2,5$  см (меньше 10% от соответствующих средних значений). Приведённые величины погрешности расчётов лежат, в большинстве случаев, в пределах точности измерения соответствующей характеристики

Вторая проверочная процедура заключалась в сравнении пространственных структурных функций среднемесячных величин снегозапасов и высоты снега, рассчитанных по данным наблюдений, с соответствующими величинами, определёнными по смоделированным рядам характеристик снежного покрова. Результаты сравнения показаны на рис. 6. Видно, что с помощью разработанной динамико-стохастической модели удалось рассчитать поля искомых характеристик снежного покрова, структурные функции которых близки к функциям фактических полей и также хорошо аппроксимируются степенной функцией (1). Фрактальные размерности рассчитанных полей среднемесячных снегозапасов варьируют в диапазоне  $D_{SWE}$ (модель)= $2,67 \div 2,60$ , а для поля высоты снежного покрова  $D_{depth}$ (модель)= $2,53 \div 2,41$ , что близко к значениям, полученным по фактическим данным и приведённым в предыдущем разделе.

#### **Применение динамико-стохастической модели для оценки пределов предсказуемости гидрологических процессов (на примере динамики влагозапасов мёрзлой почвы)**

Исследование предсказуемости динамики природных систем – традиционная задача для многих геофизических дисциплин. В метеорологии, например, такие исследования опираются на развитые в классических работах Э. Лоренца [38] представления о двух типах предсказуемости: предсказуемости первого рода, обусловленной внутренней неустойчивостью атмосферных процессов, их высокой чувствительностью к малым возмущениям начальных условий, и предсказуемости второго рода, связанной с изменчивостью внешних по отношению к атмосфере воздействий (океан, поверхность суши). Изучение физических механизмов и факторов предсказуемости, определение её пределов в зависимости от пространственно-временных масштабов исследуемых процессов, идентификация потенциально предсказуемых структур – эти и другие задачи научной метеорологии решаются на базе развитых уже полвека назад представлений об анализе предсказуемости как проблеме математической физики (см., например, [5]).

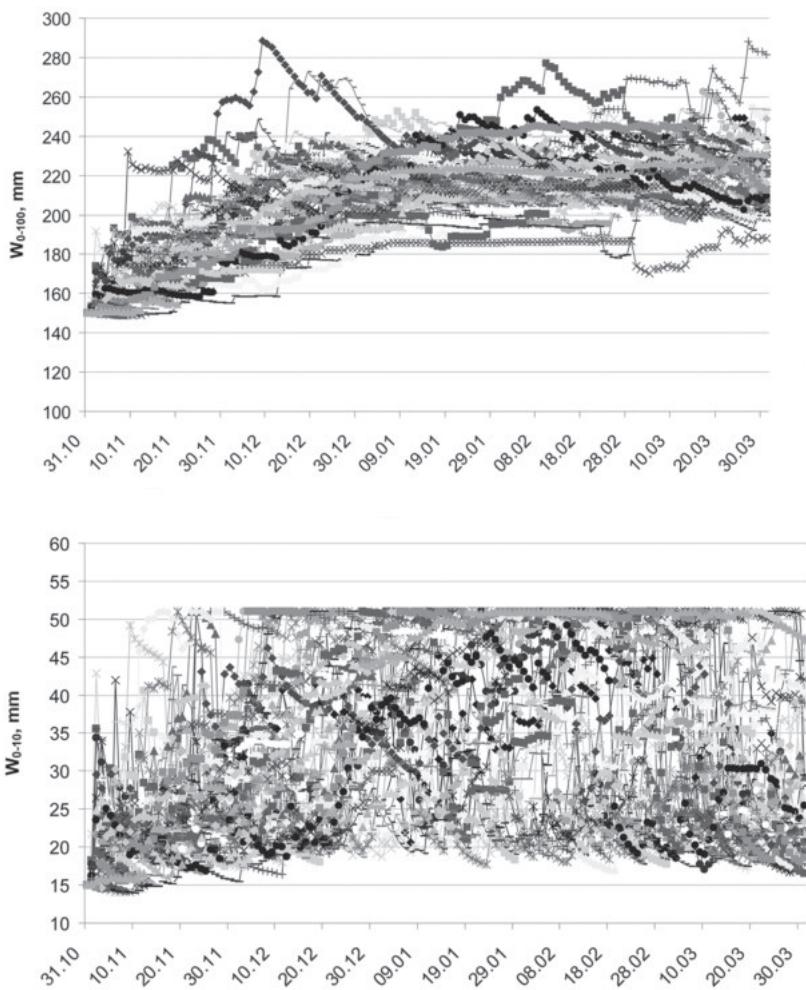


Рис. 7 Ансамбль траекторий значений суммарного влагосодержания (мм) метрового (слева) и верхнего 10-см (справа) слоев промерзающей почвы, рассчитанных при одинаковых начальных ( $W(z, 0)=0,15$ ;  $T(z, 0)=3^{\circ}\text{C}$ ) и смоделированных методом Монте-Карло граничных условиях

В гидрологии суши понятие предсказуемости на протяжении многих лет ассоциируется, как правило, с возможностью построения методики оперативного прогноза, соответствующего заданным критериям точности и заблаговременности (см., например, [47]). Такое понимание предсказуемости близко к принятому в метеорол-

логии понятию «эффективной предсказуемости» [28] или прогнозируемости («forecastability»), которая зависит, в том числе, от субъективных факторов, включая опыт и методические предпочтения разработчиков, особенности имеющейся сети наблюдений и т.п. Интерес к анализу предсказуемости, как объективному свойству гидрологической системы, возник в последние годы и связан, прежде всего, с исследованиями макромасштабной изменчивости характеристик влажности почвы и снежного покрова, направленными на углубление представлений о вкладе низкочастотной изменчивости этих характеристик в динамику климатической системы [46]. Кроме того, появились публикации, в которых исследуются факторы, влияющие на предсказуемость гидрологических процессов в масштабах речного бассейна, такие как: пространственное усреднение процессов [24], нелинейность гидрологических систем [49], гидравлические свойства бассейна [37]. Есть основания полагать, что построение концептуальных основ анализа предсказуемости гидрологических систем становится одной из ключевых проблем научной гидрологии [22].

Возможности создания методов изучения физических механизмов и оценки предсказуемости гидрологических систем связаны с использованием достижений в области динамико-стохастического моделирования. Ниже показано, как такие возможности могут быть реализованы на примере оценки предсказуемости влагосодержания мёрзлой почвы – основного фактора потерь талого стока при формировании весеннего половодья в бассейнах равнинных рек с преимущественно снеговым питанием (по работе [2]).

#### **Динамико-стохастическая модель неизотермического влагопереноса в мёрзлой почве.**

В структуре разработанной динамико-стохастической модели объединены два компонента: (1) физико-математическая модель вертикального влагопереноса в мёрзлой почве учётом накопления и таяния снежного покрова на её поверхности и (2) точечный стохастический генератор погоды.

Физико-математическая модель основана на решении системы нелинейных уравнений тепло- и влагопереноса и описывает гидротермический режим почвы в процессе её промерзания, оттаивания и инфильтрации талой воды с учётом фазовых переходов вода-лёд,

влияния переохлажденной влаги. Используемая система уравнений и методы их численного интегрирования, результаты испытаний модели по данным лабораторных и натурных экспериментов Гидрофизической лаборатории Государственного гидрологического института и натурных наблюдений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции описаны в [29]. Использованный точечный стохастический генератор погоды, позволяющий воспроизводить методом Монте-Карло многолетние искусственные последовательности метеорологических переменных суточного разрешения в заданной точке (без учёта пространственных связей между метеорологическими переменными) описан в [1]. Там же подробно даны результаты калибровки и тестирования точечного генератора погоды по данным метеорологических измерений на территории лесостепной зоны ЕТР.

### **Оценка пределов предсказуемости: организация и результаты численных экспериментов.**

Численные эксперименты для оценки потенциальной предсказуемости влагозапасов почвы в осенне-зимний период проводились с использованием данных наблюдений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции и были организованы следующим образом.

Расчёты велись для периода с 1 ноября по 31 марта. Начальные условия для решения уравнений тепло- и влагопереноса задавались в виде постоянных по глубине метровой почвенной колонки значений суммарной (жидкая вода + лёд) влажности и температуры. С помощью стохастического генератора погоды моделировался ансамбль из 1000 реализаций значений метеорологических переменных суточного разрешения за период с 1 ноября по 31 марта. Температура воздуха, осадки и рассчитанное по влажности воздуха испарение почвенной влаги задавались в качестве граничных условий для расчётных уравнений тепло- и влагопереноса при отсутствии снега. При наличии на поверхности почвы снежного покрова (его характеристики рассчитывались по генерированным метеорологическим «входам» с помощью однослойной модели, представленной в предыдущем разделе) граничные условия задавались в виде потоков тепла и влаги на границе снег-почва.

В результате с помощью динамико-стохастической модели был рассчитан ансамбль из  $N=1000$  траекторий изменения суточных зна-

чений влажности  $W_{ijk}=W_k(z_i, t_j)$  и температуры почвы  $T_{ijk}=T_k(z_i, t_j)$  на разных глубинах в период с 1 ноября по 31 марта (здесь  $k$  – номер расчётной траектории,  $k=1, 2, \dots, N$ ;  $z_i$  –  $i$ -й расчётный 10-см слой по глубине метровой почвенной колонки от её поверхности;  $i=1, 2, \dots, 10$ ;  $z_i=[10(i-1); 10i]$  [см];  $t_i$  –  $j$ -й суточный интервал времени от начала расчётов  $j=1, 2, \dots, 151$ ;  $t_i=[(j-1); j]$  [сут]). Каждая из 1000 траекторий рассчитывалась при заданных (одинаковых для всех расчётов) начальных условиях и случайных, смоделированных методом Монте-Карло, граничных условиях. Рассчитанные траектории изменения суммарного влагосодержания верхнего 10-см слоя почвы при постоянной по глубине  $z$  начальной объёмной влажности, равной 0,15 и температуре почвы, равной 3°C, показаны на рис. 7 (в качестве примера показаны 50 из 1000 траекторий).

Для каждого расчётного шага  $t_j$  и почвенного слоя  $z_i$  рассчитывалось среднеквадратическое по ансамблю  $N=1000$  траекторий отклонение  $\sigma_{ij}(W)$  влажности почвы:

$$y_{ij}(W)=\sqrt{\sum_{k=1}^N (W_{ijk}-\bar{W}_{ij})^2 \times (N-1)^{-1}}, \quad (3)$$

где  $\bar{W}_{ij}=N^{-1} \sum_{k=1}^N W_{ijk}$  – среднее по ансамблю траекторий значение влажности почвы в слое  $z_i$  и на временном шаге  $t_j$ .

Величина  $\sigma_{ij}(W)$  задавалась в качестве вероятностной меры, по времени сходимости которой к устойчивому значению определялась потенциальная предсказуемость влажности почвы. Горизонт потенциальной предсказуемости  $\Delta_i(W)$  влажности почвенного слоя  $z_i$  оценивался из условия:

$$\Delta_i=\min(j) : \left| \frac{y_{ij}-y_{i(j-1)}}{y_{ij}} \right| \leq \alpha, \quad j=1, 2, \dots, 151 \quad (4)$$

На рис. 8 показано, как меняется величина  $\sigma_{ij}(W)$  по мере удаления от начальной расчётной даты расчёта (1 ноября) при разных начальных условиях (на примере суммарных влагозапасов метрового слоя промерзающей почвы).

Оказалось, что предел предсказуемости суммарных влагозапасов почвенной колонки, рассчитанный по формуле (4) при  $\alpha=1\%$ , меняется в довольно узком диапазоне – от 31 до 42 суток, при заданных значительных изменениях начальных условий ( $W(z, 0)=0,15 \div 0,25$ ;

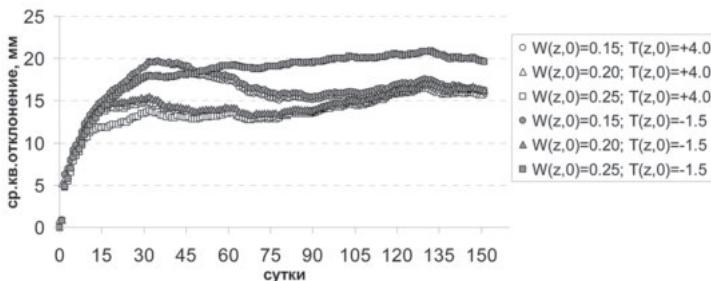


Рис. 8. Изменение среднеквадратического по ансамблю 1000 траекторий отклонения рассчитанной влажности метрового слоя промерзающей почвы по мере удаления от начальной расчётной даты расчёта (1 ноября) при разных начальных условиях

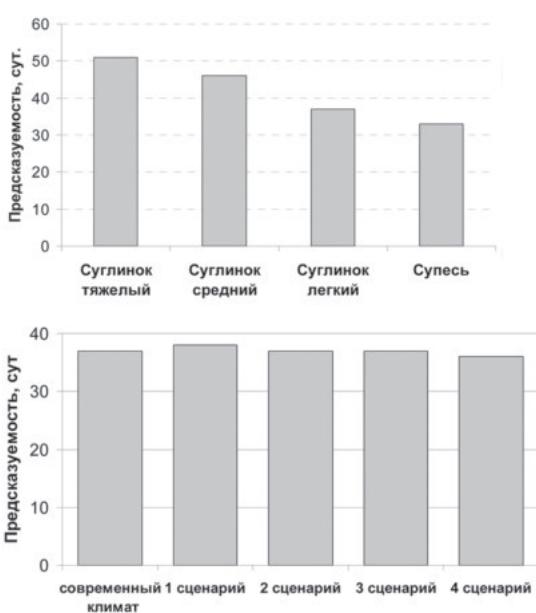


Рис. 9. Предсказуемость влагозапаса метрового слоя промерзающей почвы в зависимости от её механического состава (слева) и климатических норм (справа) температуры воздуха  $T_\alpha$  и осадков Р: (сценарии: 1 –  $T_\alpha$  увеличена на  $2^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T_\alpha$  – на  $1^{\circ}\text{C}$ ; 3 – Р увеличена на 10%; 4 – Р – на 20%)

$T(z, 0)=-1.5 \div +4^{\circ}\text{C}$ ). В целом полученные оценки предсказуемости запаса влаги для отдельных 10-см слоёв промерзающей почвенной колонки показали, что предсказуемость растёт с увеличением глубины слоя: для нижнего слоя 90–100 см предсказуемость достигает 74 суток.

Проведены две серии численных эксперимента по оценке чувствительности рассчитанного предела предсказуемости запаса влаги метрового слоя промерзающей почвы: (1) к изменениям её механического состава, влияющего на гидравлические и теплофизические параметры уравнений тепло- и влагопереноса, а также (2) к изменениям климатических норм температуры и осадков, задаваемых в качестве параметров стохастического генератора погоды. Результаты численных экспериментов представлены на рис. 9. Проведённые эксперименты показали, что предсказуемость влагозапаса метрового слоя промерзающей почвы растёт для почв более тяжёлого механического состава, достигая для тяжёлого суглинка 51 суток. Вместе с тем, изменения климатических характеристик не оказали заметного влияния на предел предсказуемости влагозапаса почвы.

Таким образом, важным свойством рассматриваемой системы является то, что её предсказуемость зависит от внутренних свойств системы в большей степени, чем от характеристик вынуждающего процесса. Аналогичный результат для линейной динамико-стохастической системы получен аналитически в работе [4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М., Наука, 2007. 294 с.
2. Гельфанд А.Н. Оценка предсказуемости гидрологических процессов. // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, Т. 2, 2015. С. 100–109
3. Гельфанд А.Н., Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования // Лёд и Снег, Т. 55, №4, 2015. С. 61–72
4. Демченко П.Ф., Кислов А.В. Стохастическая динамика природных объектов: броуновское движение и геофизические приложения. М., ГЕОС, 2010. 189 с.
5. Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М., ИВМ РАН, 2007. 283 с.
6. Каган Р.Л. Осреднение метеорологических полей. Л., Гидрометеоиздат, 1979. 212 с.
7. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М., 2008. 394 с.
8. Кучмент Л.С., Гельфанд А.Н. Совместное использование детерминистического и вероятностного подходов к расчетам характеристик максимального стока // Метеорология и гидрология, №6, 2010. С. 74–86

9. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. () Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока // Метеорология и гидрология, №2, 2009. С. 54–67
10. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология, №2, 2007. С. 83–95
11. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М., Наука, 1993. 104 с.
12. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. () Динамико-стохастические модели формирования дождевого и талого стока // Водные ресурсы, №4, 1991. С. 5–14.
13. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М., Наука, 1983. 216 с.
14. Морейдо В.М. Разработка методов ансамблевого прогноза характеристик сезонного речного стока (на примере притока воды в Чебоксарское водохранилище). Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук: 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия / ИВП РАН, Москва, 2015. 185 с.
15. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах: 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы, 43(3), 2016. С. 243–253.
16. Мотовилов Ю.Г. Моделирование снежного покрова и снеготаяния // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов / Под ред. Кучмента Л.С., Музылев Е.Л. М., Изд-во НГК РАН, 1993. С. 9–37.
17. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л., Гидрометеоиздат, 1989. 358 с.
18. Решение совместного заседания НТС Росгидромета, Научного совета РАН «Исследования по теории климата Земли» и НТС Росводресурсов по вопросу «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации», Москва, 20 января 2014 г. / В кн.: «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. Сборник докладов». М.: Росгидромет, 2014. 207 с.
19. Сванидзе Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. Л., Гидрометеоиздат, 1977. 311 с.
20. Федер Е. Фракталы. М., Мир, 1991. 261 с.
21. Abbott M.B, Bathurst J.C, Cunge J.A, O'Conell P.E, Rasmussen E. An introduction in European hydrological system – Systeme Hydrologique Européen SHE. Journal of Hydrology. 87, 1986. P. 45–77.
22. Blöschl G. Hydrologic synthesis: Across processes, places, and scales, Water Resources Research, 42, 2006. W03S02, doi:10.1029/2005WR004319.
23. Blöschl G., Kirnbauer R. An analysis of snow cover patterns in a small alpine catchment // Hydrological Processes. V.6, 1992. P. 99–109.
24. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: A review, Hydrol. Processes, 9, 1995. P. 251–290

25. Borsch S., Simonov Y. Operational Hydrologic Forecast System in Russia. In Flood Forecasting A Global Perspective (Edited by: Thomas E. Adams and Thomas Pagano), Chapter 7, 2016. P. 169–181
26. Cline DW, Bales RC, Dozier J. Estimation the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling. // Water Resources Research. V34, 1998. P. 1275–1285.
27. Day G N () Extended streamflow forecasting using NWS-RFS J. Water Resour. Planning Manage.111, 1985. P. 157–170
28. Douville H. Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study. Climate Dynamics. 34(6), 2010. P. 797–818
29. Gelfan A.N. Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parametrization by basic soil data, in: Sivapalan M. et al. (Eds), Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress. IAHS Publ. 303: Foz do Iguazu, Brazil, 2006. P. 293–304.
30. Gelfan A., Moreydo V. and Motovilov Y. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary reservoir under the differently constructed weather scenarios, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 2017. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-389>, in review, 2017.
31. Gelfan A., Motovilov Y., Moreido V. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir. Proc. IAHS, 369, 2015. P. 115–120, [proc-iahs.net/369/115/2015/](http://proc-iahs.net/369/115/2015/) doi:10.5194/piahs-369-115-2015
32. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Assessment of extreme flood characteristics based on a dynamic-stochastic model of runoff generation and the probable maximum discharge. Journal of Flood Risk Management 4, 2011. P. 115–127 10.1111/j.1753-318X.2011.01096.x
33. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Long-term probabilistic forecasting of snowmelt flood characteristics and the forecast uncertainty In: E. Boegh et al., (Eds.) Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management (Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007). IAHS Publ. 313, 2007. P. 213–221
34. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Estimation of extreme flood characteristics using physically based models of runoff generation and stochastic meteorological inputs. Water International, 27(1), 2002. P. 77–86.
35. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Statistical self-similarity of spatial variations of snow cover: verification of the hypothesis and application in the snowmelt runoff generation models. // Hydrol. Processes. V.15(18)? 2001. P. 3343–3355.
36. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Dynamic-stochastic models of rainfall and snowmelt runoff formation. J. Hydr. Sci. V. 36. N2, 1991. P. 153–169.
37. Kumar P. Typology of hydrologic predictability. Water Resources Research, 47, 2011. W00H05, doi:10.1029/2010WR009769.
38. Lorenz E.N. Climatic predictability, in The Physical Basis of Climate and Climate Modelling, edited by B. Bolin et al., GARP Publ. Ser., vol. 16, pp. 132–136, World Meteorol. Organ., Geneva, Switzerland, 1975
39. Marsh P. Snowcover formation and melt: recent advances and future prospects. Hydrol. Process. 13, 1999, P. 2117–2134.

40. Massart P. The tight constant in the Dvoretzky–Kiefer–Wolfowitz inequality, *The Annals of Probability*, 18 (3), 1990. P. 1269–1283, MR 1062069, doi:10.1214/aop/1176990746
41. Morris E.M. Modeling the flow of mass and energy within a snowpack for hydrological forecasting. *Ann. Glaciology.* 4, 1983. P. 198–203
42. Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series, No 105, 1999.
43. Pappenberger F. et al. Hydrological ensemble prediction systems around the Globe. In: *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*, Duan et al. (Eds), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016. P. 1–35, DOI 10.1007/978-3-642-40457-3\_47-1
44. Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T., Hedstrom N.R., Quinton W.L., Granger S.K., Carey S.K. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. *Hydrological Processes.* 21, 2007. P. 2650–2667. DOI: 10.1002/hyp.6787.
45. Refsgaard J.C., Storm B. MIKE SHE., in: V.P. Singh (ed.), *Computer models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Colorado, USA, 1995. P. 809–846.
46. Report of a Workshop on Predictability & Limits-To-Prediction in Hydrologic Systems Nation. Acad. Press, Washington, D.C. 2002.138 p.
47. Shukla S., Sheffield J., Wood E.F., Lettenmaier D.P. On the sources of global land surface hydrologic predictability. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 2013. 1987–2013.
48. Singh V.P., Woolhiser D.A. Mathematical modeling of watershed hydrology. *J. Hydrol. Eng.*, 7(4), 2002. P. 270–292.
49. Zehe E., Elsenbeer H., Lindenmaier F., Schulz K., Blöschl G. Patterns of predictability in hydrological threshold systems. *Water Resources Research*, 43, 2007. W07434, doi:10.1029/2006WR005589.

# **ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ, ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ**

## **Проблемы и современные исследования гидродинамики и ледотермики русловых потоков**

*В.К. Дебольский, Е.И. Дебольская, Е.Н. Долгополова, О.Я. Масликова,  
И.И. Грицук, Д.Н. Ионов*

Лаборатория динамики русловых потоков и ледотермики – одна из старейших в Институте водных проблем. Она стала преемником отдела гидрофизики, образованного одновременно с созданием института. Первыми руководителями отдела были К.И. Россинский и Б.А. Фидман, чьи основополагающие работы послужили фундаментом всех дальнейших исследований, проводимых в лаборатории.

Основными направлениями работы лаборатории с момента её образования были и остаются до сегодняшнего дня исследования русловых процессов и транспорта наносов, речной турбулентности, ледовых процессов на водоёмах и водотоках суши, динамики дельт. Новым направлением стало исследование деформаций русел и берегов водных объектов криолитозоны.

Основой теоретического анализа и математического моделирования как главных методов фундаментальных исследований, присущих академической науке, должны быть данные наблюдений и экспериментов. Поэтому с самого начала деятельности лаборатории её сотрудниками значительное время исследований отводилось полевым и лабораторным работам. За прошедшие годы были проведены экспедиции по различным тематикам в бассейнах российских рек.

### **Исследования речной турбулентности**

Активные исследования динамики речных течений были начаты в 1968 г. под руководством Фидмана. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований вошли в книгу Фидмана «Турбулентность водных потоков», изданную после кончины автора по его плану. Глава «Речные течения» содержит обобщение методов расчёта параметров русловой турбулентности и результатов экспериментальных исследований структуры натурных потоков, проведённых под руководством Фидмана и В.К. Дебольского. На основе

обобщения теоретических положений теории турбулентности и результатов натурных и лабораторных исследований в дальнейшем была разработана статистическая модель турбулентного потока, некоторые аспекты которой приводятся в сборнике ИВП РАН [2]. В модели рассчитываются первые четыре статистических момента скорости турбулентного речного потока: средняя скорость, дисперсия средней скорости, коэффициенты асимметрии и эксцесса. Развит метод моментов Пирсона для построения распределения случайной величины по её первым четырём статистическим моментам. Анализ многочисленных результатов экспериментов в лабораторных и речных потоках позволил построить трёхслойную модель течения для расчётов распределения третьего и четвёртого моментов и показать, что распределение пульсаций продольной составляющей скорости в придонной области существенно отличается от Гауссовского, здесь с большей вероятностью реализуются пульсации скорости, превышающие среднюю величину. Этот вывод очень важен при описании взаимодействия потока с частицами наносов и загрязняющих веществ на дне. Вблизи поверхности распределение пульсаций продольной составляющей скорости практически не отличается от нормального, что позволило получить простые формулы для расчёта распространения примеси по поверхности природного потока.

Разработанная модель природного потока использовалась в последующих исследованиях для разработки методов расчёта переноса загрязняющих веществ в реках и каналах, изучения условий начала движения наносов, оценки преобразований энергетических характеристик в речном потоке, изучения формирования пограничных слоёв в и слоёв смешения в подлёдных течениях, исследования влияния льда на напряжение трения на дне и на условия жизни биоты и т.д.

Активное использование водных ресурсов вызывает необходимость оценивать скорость переноса и трансформации загрязняющих веществ и прогнозировать возможности самоочищения водных объектов. Перенос примеси существенно зависит от интенсивности турбулентности руслового потока. Хотя коэффициент турбулентной диффузии  $K$  невелик, и турбулентный перенос примеси мал по сравнению с аддективным переносом, он играет большую роль в

жизни рек и водохранилищ. Турублентная диффузия является одним из механизмов передачи кислорода в придонной области потока. Также вопрос о величине и распределении  $K$  по глубине потока встаёт при оценке времени разбавления сточных вод до неопасной концентрации.

Например, с помощью математического моделирования турбулентной диффузии в природном течении шириной  $B$  и глубиной  $h$ , при неполной автомодельности потока в приближении плоского потока ( $h/B \ll 1$ ), Е.Н. Долгополовой [31] получено выражение для распределения коэффициента турбулентного переноса по глубине, зависящее от средних характеристик течения:

$$K_y = \frac{\kappa^2 \langle u \rangle h n (1-y/h)}{(1+n)(y/h)^{n-1}}, \quad (1)$$

где  $y$  – вертикальная координата,  $\langle u \rangle$  – средняя по глубине скорость течения на данной вертикали,  $n$  – показатель степени, зависящий от  $Re_*$ ,  $\kappa$  – постоянная Кармана.

Или нормируя  $K'_y$  на  $\langle u \rangle h \kappa n$  получим выражение

$$K''_y = \frac{\kappa(1-y/h)}{(1+n)(y/h)^{n-1}} \quad (2)$$

При изменении  $n$  в диапазоне  $n=0,1-0,3$  коэффициент  $K''_y$  (рис. 1) можно считать универсальным для потоков в реках.

Формирование турбулентных слоёв смешения исследовалось в устьях разных рек, где происходит взаимодействие речных и морских, особенно при большой величине прилива или морских нагонах. Определены характеристики эстуариев необходимые для образования внутренних волн, способствующих проникновению осо-

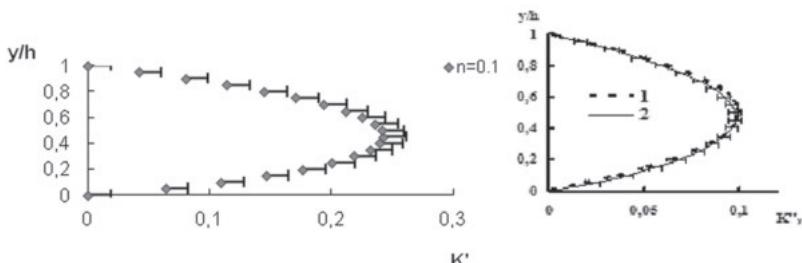


Рис. 1. Универсальное распределение по глубине коэффициента турбулентной диффузии, полученного в [32], и рассчитанного из выражений (1) и (2)

лонённых вод в устье реки, распространению прилива в виде бора [22, 23].

### **Подлёдная турбулентность**

Турбулентная диффузия играет важную роль в процессах массо- и термопереноса в подледных потоках, а также при весеннем таянии льда на озёрах и водохранилищах. При её расчётах в первом приближении часто подлёдное течение рассматривается, как состоящее из двух слоёв, сформированных дном и нижней поверхностью льда, движение жидкости в каждом из этих слоёв описывается уравнением для плоского потока. Границей между этими потоками можно считать линию максимальной средней скорости. Известно, что ни логарифмический, ни степенной закон, которые описывают распределение средней скорости по глубине потока, не дают нулевых градиентов скорости в точке, где скорость максимальна. Тем не менее, был предложен метод расчёта гидравлического сопротивления и распределения коэффициента турбулентного переноса по глубине подлёдного потока при условии, что разрывом производной скорости на границе сопряжения потоков можно пренебречь и описать профиль скорости в каждом потоке степенным законом с показателями степени, характеризующими соответственно шероховатости дна и нижней поверхности льда [30]. Полученное распределение дисперсии продольной составляющей скорости потока по глубине свидетельствует о том, что в подлёдном потоке формируется слой смешения между придонным потоком и потоком у нижней поверхности льда. Анализ распределений асимметрии и эксцесса по глубине подлёдного потока показал, что распределение пульсаций продольной составляющей скорости не удовлетворяет нормальному закону. Более вероятны пульсации, превышающие величину средней скорости и сосредоточенные в гораздо более узком диапазоне, чем при нормальном распределении. Полученные результаты привели к выводу, что подлёдный поток необходимо рассматривать как взаимодействие двух пристеночных пограничных слоёв. В последние десятилетия в силу развития технической базы стало возможно более подробно изучить внутреннюю структуру турбулентности в пограничном слое у стенки, выделить когерентные структуры и описать динамику их развития, связав с классической картиной осреднённого поля скорости. Существенное внимание

в последнее время уделялось проблеме определения коэффициента турбулентного обмена в плоскости нулевых касательных напряжений, представляющей собой характерную особенность подлёдных потоков. Неоднозначность такого определения – следствие наличия двух близко расположенных пограничных слоёв, образованных обтеканием поверхностей с разной шероховатостью.

Анализ данных измерений, проведённых в природных подлёдных потоках [7, 17], позволил предположить, что взаимодействие крупных вихревых структур может развиваться по разным сценариям. Это различие определяется такими параметрами потока, как его расход и шероховатости донной и ледовой поверхностей. Модель когерентных структур в подледном потоке (КСПП), разработанная Дебольской [7, 9], основана на двух независимых системах уравнений, которые решаются численно в разных временных масштабах. Первая система содержит уравнения движения жидкости для градиентно-вязкого режима, хорошо соответствующего течению в неглубоких потоках, уравнения переноса кинетической энергии, соотношения Прандтля и Колмогорова для связи этой энергии с масштабом турбулентности и коэффициентом турбулентного обмена. Предполагается, что получаемый при решении этой системы коэффициент турбулентного обмена остаётся постоянным в течение времени, необходимого для расчёта таких характеристик потока, как мгновенная скорость и турбулентное касательное напряжение, изменяющихся под действием всплеска на твёрдых поверхностях и рассчитываемых с помощью второй системы уравнений. Вторая система уравнений используется для расчёта поля турбулентного касательного напряжения, получающегося в результате всплесков этой величины на твёрдых поверхностях, и состоит из уравнения неразрывности и релаксационного уравнения типа Хинце. Основная цель моделирования – проверка возможности возникновения различных сценариев развития придонного и подлёдного пограничных слоёв. Это различие зависит от соотношения шероховатостей донной и ледовой поверхностей и глубины потока. Два полноценных пограничных слоя могут существовать только в случае, если размер каждого меньше половины глубины потока.

Анализ данных натурных и численных экспериментов, выполненных с помощью модели (КСПП), подтвердил вывод о том, что

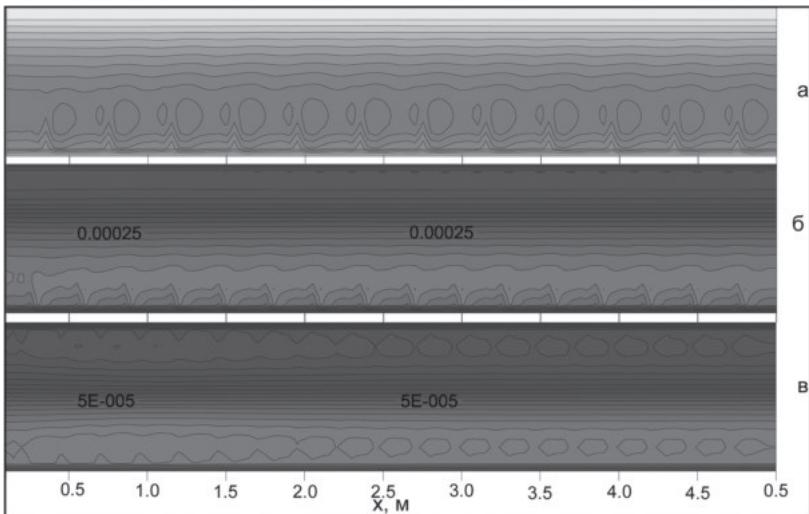


Рис. 2. Изолинии турбулентных напряжений трения, рассчитанные по модели, в плоскости  $x - z$  для открытого потока (а) и потоков с гладким (б) и шероховатым (в) покрытием

существуют две системы крупномасштабных вихрей в погранслоях, образованных при обтекании донной и ледовой поверхностей. При взаимодействии двух пограничных слоёв существенную роль играет различие в шероховатости обтекаемых поверхностей. Если поток имеет глубину, недостаточную для полного развития двух пограничных слоёв, между ними может возникнуть конкуренция. При этом крупномасштабные вихри или когерентные структуры, образуемые у одной поверхности, будут препятствовать развитию столь же крупных вихрей у противоположной поверхности, как бы сворачивая их. На рис. 2 представлены распределения турбулентных напряжений трения соответственно для трёх потоков (открытого – а, подлёдного со смоченным льдом – б и подлёдного с шероховатым льдом – в). Из рисунков видно, что в открытом потоке развивается одна система вихрей, образующихся на дне, в потоке со смоченным льдом образующиеся структуры на поверхности льда выражены незначительно, в потоке с шероховатым льдом, структуры, формирующиеся на поверхности льда и дна почти равнозначны.

## **Исследования ледовых процессов**

Для решения проблем, связанных с использованием водных ресурсов поверхностных водных объектов, особенно в зимних условиях, в силу особенностей географического расположения РФ необходимо наличие возможно более полной информации о ледовых процессах в реках и водоёмах; ведь большая часть из них значительный период года (иногда до 9 месяцев, например – Обская губа) покрыта льдом. Начальная стадия формирования ледяного покрова и его разрушение в период ледохода часто вызывают катастрофические подъёмы уровней воды. На территории РФ в целом ряде регионов (Архангельская и Вологодская области, Якутия, Иркутская область и др.) зимние наводнения, спровоцированные ледовыми заторами, происходят ежегодно, а наносимые ими ущербы весьма ощутимы не только для местных, но и для федерального бюджетов. За весь период существования Института водных проблем РАН исследования ледовых процессов постоянно развивались. Эти исследования носили как фундаментальный, так и прикладной характер. Обобщены данные по ледовым затруднениям на территории РФ, разработаны методики прогнозирования возможных катастрофических ситуаций в зимний период, связанных с распространением загрязняющих веществ в водотоке при активных ледовых явлениях [20]. Особое внимание уделялось измерениям на натурных объектах гидродинамических характеристик подлёдных потоков, что явилось основой для параметризации турбулентности этих потоков и создания математических моделей взаимодействия потока с ледяным покровом.

Использование математического моделирования при исследовании динамики подлёдных потоков выдвигает целый ряд жёстких требований к постановке задачи, умению чётко определять временные и пространственные масштабы процессов. Эти требования, прежде всего, необходимы для того, чтобы оптимально выбрать размерность модели и используемые уравнения.

В рамках гидравлического или одномерного приближения могут быть решены задачи, в которых учтено лишь основное отличие подлёдных и открытых потоков – наличие дополнительного сопротивления. При решении таких задач можно получить изменение интегральных характеристик, таких как расходы или средние по сечению

скорости и глубины потоков. Тем не менее, именно этот класс задач позволяет делать прогнозы о динамике ледяного покрова (его деформациях и возможных разрушениях), так как временные и пространственные масштабы механических изменений льда соответствуют масштабам изменения интегральных характеристик потока [7].

### **Заторы. Исследования криолитозоны**

Одно из главных направлений исследований, проводимых в лаборатории, – изучение гидрофизических и гидрологических процессов в криолитозоне. Актуальность этого направления обусловлена, прежде всего, тем, что расположение в зоне многолетнемёрзлых пород (ММП) является серьёзным фактором риска повреждения плотин и деформаций берегов водохранилищ и нижних бьефов гидротехнических сооружений. Глобальные климатические изменения, происходящие в последние десятилетия, существенным образом влияют на гидрологические и термодинамические процессы в гидросфере Земли и, особенно, в криолитозоне, поскольку сдвиги сроков и частоты перехода температуры окружающей среды через 0°C запускают фазовые переходы в системе вода–лёд в моменты, являющиеся аномальными для конкретных северных территорий. Не устойчивые к смене температуры мерзлые породы способны легко переходить в талое состояние и наоборот – из талого в мёрзлое, что сопровождается развитием целого ряда неблагоприятных и опасных геокриологических процессов, а также негативными изменениями экологической обстановки. Климатические изменения вкупе с хозяйственной деятельностью человека и развернувшимся в криолитозоне обширным гидротехническим строительством приводят к нарушениям в гидрологическом балансе сети северных рек. Оттаивание ММП, помимо проблем с гидротехническим и инженерным строительством, оказывает огромное влияние на деструктивные процессы берегов водных объектов, особенно в районах с максимальной льдистостью. Из чрезвычайно стабильной системы мерзлота превращается в уязвимую и неустойчивую.

Появление новых кратеров, обвалов и больших котлованов (например, обнажение Ледяная гора в 120 км южнее Игарки, Иннокентьевское в устье Енисея, кратер Батагайка неподалеку от бассейна реки Яна) – это наглядное свидетельство того влияния, которое

климатические изменения оказывают на деформационные процессы в водных объектах, расположенных в районах многолетней мерзлоты.

Поскольку потепление климата вызывает повсеместное таяние снега и льда, альbedo изменяется. Вместо того, чтобы отражать солнечный свет, пейзаж начинает поглощать больше тепла, чем это было ранее, что ещё больше увеличивает тенденции потепления и таяния в этом районе.

Воздействие гидротехнических сооружений на русла в криолитозоне – проблема, для решения которой необходимо не только проведение изыскательских работ, но и привлечение современных возможностей математического моделирования. В каждом конкретном случае, в соответствии с особенностями мерзлотно-геологических, геоморфологических и гидрологических условий, проявляются те или иные реакции речной системы на гидротехнические сооружения. Главные из них – это русловые деформации на участке нижнего бьефа, изменения термического, ледового и паводкового режимов, а также изменения естественного хода уровня водной поверхности и твёрдого расходов в различных временных масштабах (суточном, сезонном, многолетнем). Систематические натурные исследования с получением кондиционного фактического материала по этой проблематике в криолитозоне практически не проводились. Трудности с прогнозированием деформаций русел, сложенных ММП, связаны с невозможностью проведения натурных наблюдений в период развития наводнений. Исследование этого сложного и многофакторного процесса может быть выполнено с достаточной степенью адекватности лишь с помощью математического моделирования.

В целях изучения природы деструктивных криогенных береговых процессов и влияния этих процессов на экологию окружающей среды лабораторией динамики русловых процессов и ледотермики разработана модель разрушения берегов северных водоёмов под действием таких факторов, как повышение температуры окружающей среды, солнечная радиация и связанное с ней снеготаяние. Основой математической модели послужили данные лабораторных экспериментов [3]. Существенной особенностью формирования поверхностного стока, ответственного за переформирование русла в



Рис. 3. Схема распределения потоков жидкости при оттаивании мёрзлых грунтов

условиях криолитозоны и в период сезонных изменений температур, является тот факт, что в почве присутствуют потоки воды, образованные при оттаивании мёрзлой породы. В связи с этим гидравлическая проводимость почвы изменяется.

Модель состоит из нескольких взаимосвязанных между собой блоков, представленных на рис. 3. В условиях оттаивания породы происходит перераспределение долей в каждом блоке, а именно: увеличивается доля талых потоков, при этом изменяется влагоудерживающая способность для данного вида почв. Как следствие, изменяется возможная инфильтрация в грунт, что в свою очередь приводит к тому, что доля склоновых потоков также изменяется во времени. По окончании оттаивания грунта процесс движения влаги внутри склона стабилизируется, и доля склоновых потоков будет зависеть только от атмосферных осадков. Были расписаны уравнения для каждого из этих блоков. Особое внимание было уделено снеготаянию под действием конвективных и радиационных потоков.

В процессе работы были получены важные выводы о том, что русло реки в условиях криолитозоны можно моделировать как трёхслойную систему – сезонноталый слой, ММП и талик. Для каждого слоя могут быть записаны соответствующие системы уравнений термо- и гидродинамики, адекватно отражающие состояние изменения грунта и внешних условий. Наиболее сильно размывает-

ся верхний, сезонноталый слой, что объясняется большей рыхлостью и подвижностью грунта этого слоя, который подвергается воздействию не только максимальных скоростей потока на поверхности, но и влиянию внутристеклоновых, фильтрационных и дождевых потоков. Слой ММП за счёт его высокой сцепленности разрушается гораздо медленнее, для него характерны другие временные интервалы (десятки и сотни лет). Слой талика часто не размывается из-за небольших придонных скоростей. Предложена система уравнений, описывающая движение породы по склонам в условиях криолитозоны с учётом интенсивности дождя и изменяющейся во времени льдистости грунта [3, 26]. При неразмывающих скоростях потока деформации склона обусловлены исключительно проседанием оттаявшего грунта и выдвижения его к центру потока [27].

На основе проведённых в лабораторных условиях исследований тающего снега и последующей инфильтрации талых потоков в грунт выделены три фазы таяния снега: аккумуляция, интенсивный сток и непрерывное таяние. При наличии дождя процесс снеготаяния имеет более сложный характер – происходит наложение нескольких процессов: фаза непрерывного таяния совмещается с фазой последующей аккумуляции. Дождь усиливает интенсивность процесса и изменяет предельное значение содержания воды в фирне во времени. Это особенно заметно при большей интенсивности дождя [4].

Исследованы различия в интенсивности воздействия на снег инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) излучения. Вся длинноволновая радиация поглощается верхним слоем снега, и ИК участок спектра несёт энергию, преобразующуюся в тепловую уже на поверхности снега [5]. Облачность является задерживающим фактором только для ИК участка спектра. Поэтому в дневные часы воздействие ультрафиолета на снеготаяние происходит при любой погоде (кроме дождливой), тогда как инфракрасное излучение действует непосредственно лишь в ясные дни. Под воздействием ИК излучения альбедо снежного покрова изменяется и достигает нулевого значения быстрее. УФ-волны практически сразу проникают вглубь снега, чем и объясняется меньшее отражение с поверхности, но альбедо под воздействием УФ-лучей уменьшается с меньшим коэффициентом экстинкции [27].

Полученные результаты исследования каждого из составляющих единого термогидродинамического процесса являются необходимой частью общего прогноза влияния изменения климата на течение деструкционных криогенных процессов в зоне ММП. Изучение этих процессов даст ответы на многие вопросы и поможет дать рекомендации относительно дальнейшей экологической, хозяйственной и строительной деятельности на территории криолитозоны.

### **Русловые процессы. Устья в криолитозоне**

Исследования русловых процессов в лаборатории во многом основываются на работах К.И. Россинского, который сформулировал основные положения динамики русла, вывел важнейшие закономерности движения речных наносов, показал роль грядового движения наносов в формировании речных русел. Глубокая эрудиция в этой области наряду с тонким пониманием физических основ динамики реальной жидкости позволили ему в 1950-х гг. разработать эффективный метод расчёта русловых деформаций в нижних бьефах гидроэлектростанций. Для научных работ Россинского всегда были характерны физическая обоснованность и ясная теоретическая трактовка при неизменной конкретной направленности конечных результатов.

Развитие и совершенствование представлений Россинского [28] о транспорте наносов и переформировании русел позволили разработать новые подходы и методы решения этой проблемы. Транспортирующая способность потоков и особенно влияние на неё нестационарности течения представляется одной из наиболее изучаемых областей гидрологии. Ведущую роль в становлении теории транспортирующей способности играли работы советских исследователей. За рубежом в последние десятилетия достаточно интенсивно развивался аппарат математического моделирования транспорта наносов и деформаций дна. Однако большинство работ в этой области науки было посвящено открытым потокам. Теоретические исследования изменения режима транспортирующей способности потоков при наступлении ледостава и особенно в условиях формирования заторов практически не проводятся, несмотря на то что решение этой проблемы может дать важные практические результаты для борьбы с предотвращением катастрофических последствий заторных наводнений. В связи с этим до сих пор был недостат-

точно развит и аппарат математического моделирования, как наиболее приемлемый метод изучения этого плохо поддающегося натурному наблюдению и лабораторному моделированию явления. При математическом моделировании транспорта наносов в открытом потоке наибольшее распространение имеют одномерные модели, основанные на применении системы уравнений движения и неразрывности типа Сен-Венана в консервативной или неконсервативной форме для описания динамики жидкости в совокупности с уравнением неразрывности Экснера для твёрдой фазы (наносов). Для записи величины расхода наносов, входящего в уравнение Экснера, существует очень большое количество эмпирических и полуэмпирических зависимостей, что зачастую затрудняет их выбор для решения общей задачи. При этом результаты моделирования при использовании различных зависимостей могут быть не только не совпадающими, но и противоречащими друг другу. В связи с этим имеет смысл проводить численные эксперименты, используя различные соотношения для определения расхода наносов, и останавливать свой выбор на тех из них, с помощью которых могут быть получены результаты, не противоречащие здравому смыслу, по крайней мере, для очевидных вариантов решения. Для русел с преобладанием крупного (галечного или гравийного материала) обычно используют уравнение Экснера без учёта взвешенных наносов. В руслах, сложенных более мелким по гранулометрическому составу материалом, необходимо учитывать расход взвешенных наносов, для определения которого используется либо уравнение переноса примеси, либо этот расход рассчитывается интегрированием по

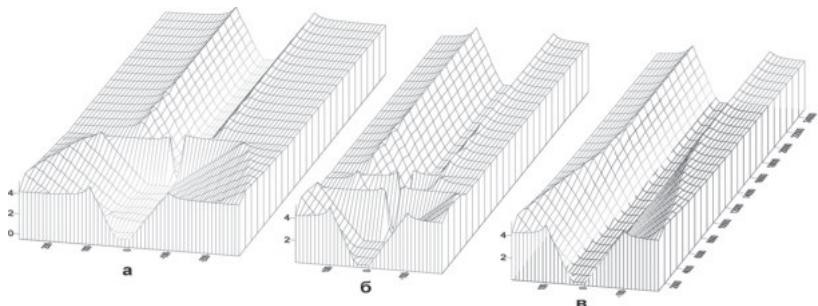


Рис. 4. Рельефы русла через 20 мин попуска  $\kappa_{\text{поп}}=3$  в потоке со льдом (а),  $\kappa_{\text{поп}}=2$  в потоке со льдом (б),  $\kappa_{\text{поп}}=2$  в открытом потоке (в)

глубине произведения скорости потока и концентрации примеси на данном горизонте от дна, полученные эмпирическими или полу-эмпирическими методами. Как тот, так и другой подход требует знания вертикального распределения скорости и концентрации взвешенных наносов, то есть решения двухмерной задачи.

При моделировании наводнений и русловых деформаций, вызванных волновым воздействием и формированием ледовых затопров в нижних бьефах гидротехнических сооружений, основное внимание было уделено определению значимости факторов, влияющих на развитие изучаемых явлений. Разработанная двухмерная модель позволила выявить определяющие параметры задачи, способные привести к наиболее неблагоприятным последствиям при зимних наводнениях. Наиболее значимыми факторами, вызывающими максимальные площади затопления, оказались параметры волны возмущения и форма поперечного сечения русла. На условия возникновения затопров в значительной степени влияют толщина льда и размеры приплотинной полыни.

Численные эксперименты показали, что изменение пористости грунта мало влияет на ширину разлива при наводнении, но от них значительно зависят вертикальные деформации русла. Объёмы размывов при увеличении пористости увеличиваются в степенной зависимости. Расчёты по двухмерной модели показали соответствие результатам, полученным по одномерным расчётам, о значительных деформациях в приплотинных створах при прохождении волны попуска и о возникновении значительных размывов под кромкой ледяного покрова и деформаций в месте возникновения затопа.

### **Русловые деформации на реках криолитозоны**

В рамках работ по изучению откликов криолитозоны на климатические и антропогенные воздействия были проведены исследования влияния речного потока на деформации береговых склонов, сложенных многолетнемёрзлыми породами и берегов с включениями пластов льда при повышении температуры воды в потоке. Метод исследования – лабораторное и математическое моделирование. Был разработан комплекс математических моделей для расчётов характеристик водных потоков и русловых деформаций в реках, протекающих в условиях криолитозоны.

В этот комплекс вошли модели:

- для расчётов русловых деформаций, развивающихся под действием таяния берегового склона и установившегося потока воды [10, 13];
- для расчётов русловых деформаций, развивающихся под воздействием волн различного происхождения и таяния ледяных пластин, вмороженных в береговой склон (гетерогенная модель) [12, 28, 29];
- для расчётов русловых деформаций, развивающихся при одновременном воздействии таяния грунта береговых склонов и нестационарного водного потока (гомогенная модель) [11].

В основу этих моделей и их верификации положены результаты лабораторных экспериментов, проведённых в гидравлическом лотке РУДН. В каждой фазе распределение температуры описывается уравнением теплопроводности. Условие Стефана (закон перемещения границы фазового перехода) – определяется из уравнения теплового баланса. В какой степени размыв осаждаемого грунта влияет на деформации можно оценить, рассчитав величину размыва отметок дна и твёрдых границ в образовавшихся полостях из уравнения сохранения массы переносимых наносов (уравнения деформаций). Разработанные модели описывают процесс латеральных русловых деформаций и в частности так называемый *niching* процесс (образование ниш вытаивания), что позволяет дать ответ на вопросы, давно поставленные в этой области, например, какую роль играет наличие мерзлого грунта на интенсивность размыва. Модельные эксперименты позволяют варьировать все многочисленные па-

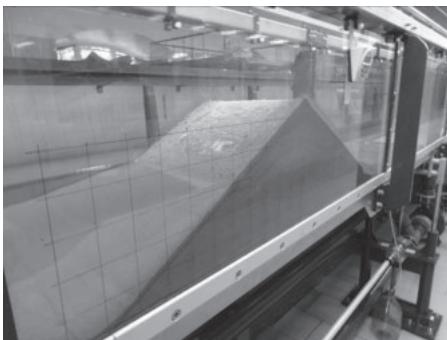


Рис. 5. Общий вид лабораторной установки

метры процесса и ответить на вопрос, какие из них являются наиболее значимыми, и к какому результату может привести любая из этих вариаций при разных условиях. На основе данных численных и лабораторных экспериментов были сделаны прогностические выводы о пространственных и временных масштабах береговых разрушений, вызванных наводнениями, для рек криолитозоны и выявлены наиболее значимые факторы, их вызывающие.

В рамках исследований волновых воздействий на берега, сложенные мёрзлыми породами, продолжаются работы по моделированию нормальных волновых воздействий на сооружения откосного типа на лабораторной модели в открытом гидравлическом лотке Российского университета дружбы народов. Для экспериментов с замороженным грунтом верхняя часть модели выдерживалась в морозильной камере в течении 24 часов при температуре  $-18^{\circ}\text{C}$ , предварительно грунт увлажнялся, после чего замороженная часть устанавливалась на нижнюю, заранее отсыпанную в лотке, часть модели. Для экспериментов с грунтами, имеющими положительные температуры, модель формировалась увлажненным грунтом на всю высоту непосредственно в самом лотке. На рис. 5 представлен вид рабочей установки для проведения экспериментов.

По данным экспериментов установлены зависимости объёма деформации модели и общего фильтрационного режима от волновых параметров [25]. Проведённые серии экспериментов на лабораторной модели показали, что размыв тела моделируемой преграды, сложенной грунтом с отрицательной температурой, при возникновении волновых процессов происходит интенсивнее, чем при прочих равных условиях преграды, сложенной песком с положительной температурой. Объём деформации мёрзлой модели в среднем на 27% превышает объём деформации модели, сложенной грунтом с положительной температурой. Серии экспериментов показали, что моделирование волновых процессов и возникающих в результате этих воздействий деформаций, достаточно с большой долей достоверности описывает естественные процессы переформирования берегового склона. Результаты проведённых исследований позволяют разработать физико-математическую модель трансформации береговых склонов под воздействием волновых процессов. Полученные результаты, могут быть использованы для прогноза

возможных береговых разрушений на реках криолитозоны, а также при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений, промышленных и жилых объектов в береговых зонах, подверженных термоабразии.

## **Исследования распространения примеси в водотоках**

### **Примесь в потоках подо льдом**

Задача о распространении примесей подо льдом занимает одно из первых мест в ряду исследований экологических последствий аварийных ситуаций в северных регионах. Их оценка невозможна без разработки соответствующих физико-математических моделей. Особенности течения рек в северных регионах предполагают, что такие модели должны учитывать не только реальную морфометрию русла, но также наличие ледяного покрова на протяжении значительной части года и приливной составляющей движения воды. Для полного описания картины распространения примеси в реке необходимы подробные измерения, но они очень дороги и трудоёмки, и не всегда позволяют сделать достоверный прогноз изменения этой картины с течением времени. Прогностические задачи на современном уровне могут быть решены только при использовании математического моделирования процесса. Ещё одно важное преимущество моделирования – это возможность решения так называемой обратной задачи, которая включает определение характера и объёма аварийного сброса по известным из измерений данным о количестве примеси в любой точке исследуемого участка реки или водохранилища. Это особенно важно для доказательства факта аварийного сброса в случае спорных ситуаций при выяснении причин загрязнения.

Были разработаны две модели распространения примеси в подледном приливном потоке: двухмерная плановая ( $x-y$ ) модель для расчёта продольно-поперечного переноса и двухмерная ( $x-z$ ) модель с учётом продольно-вертикального переноса [7]. Такое разделение обусловлено прежде всего тем, что временные масштабы процесса вертикального перемешивания значительно меньше, чем продольно-поперечного для большинства рассматриваемых течений, когда вполне правомерно допущение о полном вертикальном перемешивании. Однако при решении ряда задач необходимо знать динами-

ку распространения примеси по вертикали. Учёт влияния ледяного покрова в  $(x-y)$  модели достигался введением коэффициента, характеризующего наличие дополнительного сопротивления на поверхности льда, и соотношения для осреднённой по вертикали скорости подлёдного потока, которое отличается от соотношения для открытого потока. Аналитические оценки используемых уравнений показывают, что при переходе к ледоставному режиму отношение попечного переноса примеси к продольному может увеличиваться и служить причиной расширения струи загрязняющих веществ. Для исследования распространения примеси в подлёдном потоке и тестирования модели был выбран устьевой участок р. Северная Двина в районе Новодвинского ЦБК недалеко от г. Архангельска. Анализ данных натурных наблюдений и результатов численных экспериментов позволил получить ряд важных теоретических выводов об особенностях переноса пассивной примеси в подлёдном потоке, а также дать оценку реальных аварийных сбросов [1, 7].

Наличие ледяного покрова на поверхности водоёма препятствует поступлению кислорода в толщу воды и тем самым способствует возникновению заморов. В относительно неглубоких водоёмах влияние поверхностных гидрофизических процессов (воздействие ветра, сопротивление при обтекании донного рельефа, ледяного покрова) может распространяться на всю толщу потока и приводить к значительному переформированию его динамической структуры. Поэтому при решении диффузионной задачи в  $(x-z)$  модели [7] было учтено изменение коэффициента вертикального турбулентного обмена по глубине. Распределения всех химических компонентов модели рассчитывались с помощью двухмерных уравнений диффузии примеси с источниками. Модель была применена для Азовского моря, так как явление заморов носит здесь естественный характер и наблюдается довольно часто. Процесс образования и развития замора прослеживался по изменению концентраций гидрохимических параметров и главным образом по появлению сероводорода у дна. Было выполнено два численных эксперимента. В первом из них моделировалась гидрофизическая ситуация открытой воды, когда значения скорости на поверхности были максимальными и уменьшались ко дну, а величины коэффициента вертикального турбулентного обмена значительны. При этом замор-

ных явлений не возникало. Во втором эксперименте при прочих равных условиях была рассчитана вертикальная турбулентная структура течения, соответствующая подлёдному потоку. При этом максимальные величины скорости были в центре потока, распределение коэффициента вертикального турбулентного обмена было двухмодальным, а величины этого коэффициента были более низкими, чем в первом случае. При этом замор возникал. Данные этих расчётов показывают, что образование заморов подо льдом связано не только с затруднением поступления кислорода в приповерхностный слой воды через лёд, но и с изменением интенсивности вертикального обмена химическими элементами собственно в толще воды, связанным с перестройкой вертикальной турбулентной структуры потоков подо льдом.

### **Распространение примеси в условиях заторных наводнений**

Проблема прогнозирования и смягчения последствий катастрофических ситуаций, вызванных ледовыми явлениями, обострилась в последнее время в связи со значительным увеличением ущерба, наносимого такими катастрофами. Это связано со строительством новых и неоптимальной эксплуатацией старых гидroteхнических сооружений и промышленных предприятий, расположенных вблизи водотоков, подверженных наводнениям и потенциально опасных как источники загрязнений. Критический подъём уровня водотоков приводит к затоплению обширных территорий, прилегающих к водным объектам. Под угрозой затопления оказываются не только населённые пункты, но и объекты промышленного значения, что предполагает возможность загрязнения водной среды различными опасными для жизни и здоровья людей веществами, что может привести к возникновению катастрофических ситуаций экологического характера.

При развитии катастрофических ситуаций практически невозможно проводить натурные измерения, лабораторное же моделирование помимо обычных для открытых потоков трудностей встречает ещё дополнительную проблему моделирования разрушающего ледового покрова. Поэтому методы прогноза чрезвычайных экологических ситуаций, вызванных ледовыми явлениями, основанные на математическом моделировании, представляются наиболее при-

оритетными. При проведении численных экспериментов появляется возможность просчитать большое количество вариантов развития ситуации с различными сочетаниями параметров задачи, приводящими к образованию заторов и наиболее неблагоприятному сценарию распространения и накопления загрязняющих веществ на затапливаемых территориях.

Модель распространения загрязняющих веществ [8] во время образования ледового затора представляет собой объединение моделей заторообразования и распространения примеси в подлёдном потоке [7]. Задача о распространении примеси в условиях волнового воздействия и возникновения затора зависит не только от параметров водного объекта, волны, положения и интенсивности источника загрязнения и сочетаний этих параметров, но также и от времени и места возникновения затора, его продолжительности. В лаборатории была разработана численная модель распространения загрязняющих веществ от источника, попавшего в зону затопления, вызванного прохождением волны попуска и образованием ледовых заторов, основанная на решении двухмерных уравнений движения жидкости и уравнения переноса вещества с привлечением условий образования заторов [8]. В результате расчётов по различным сценариям можно проследить динамику распространения наводнений, вызванных действием волны попуска и образования заторов, изменение полей скорости и концентраций при развитии наводнений. В результате численных расчётов можно составить прогнозы о масштабах предполагаемой чрезвычайной экологической ситуации и дать практические рекомендации по смягчению её последствий. Предложена интегральная характеристика для оценки степени загрязнения в условиях наводнений [8], которая позволяет определить наиболее неблагоприятные факторы и параметры, влияющие на экологическую обстановку на рассматриваемом водном объекте.

### **Особенности распространения примеси в деформируемых руслах рек криолитозоны**

В последние годы большой интерес был проявлен к проблеме выноса реками органических соединений, поскольку речной сток является одним из основных источников поступления растворённых и взвешенных веществ в моря Северного Ледовитого океана. В отечественной и зарубежной литературе широко обсуждается влияние

водных объектов на процессы глобального переноса углерода между различными природными средами и отмечаемое в последнее время увеличение количества органики в Северном Ледовитом океане, причиной которого может быть таяние многолетней мерзлоты в Сибири и рост выноса органических веществ реками. Кроме того общей проблемой для арктического региона является загрязнение окружающей среды стойкими органическими соединениями и другими веществами, которые годами накапливались на этих территориях, и в частности на берегах рек, так как традиционно именно здесь располагаются населённые пункты и объекты промышленного назначения. При потеплении климата и деградации мерзлоты возрастает опасность разрушения берегов и поступления токсичных веществ из мест захоронения промышленных, бытовых, химических и радиоактивных отходов в речные воды и дальнейшего их распространения. Тем не менее, до сих не была отслежена очевидная связь разрушения берегов под действием термоэрозии с транспортом взвешенного и растворённого вещества, освобождаемого при разрушении.

Построение математических моделей должно стать главным инструментом не только для прогноза русловых процессов в условиях криолитозоны, но и для углублённого исследования многочисленных взаимосвязей, которые необходимо учитывать при этом. В лаборатории разработаны математические модели, объединяющие процессы переноса примеси, русловые деформации и различные виды таяния берегового склона [12] в условиях нестационарности водного потока. Модели могут быть использованы для прогнозирования распространения и накопления загрязнений в реках криолитозоны, берега которых подвергаются термоэрозии. Для валидации моделей проведены лабораторные эксперименты по распространению примеси в гидравлическом лотке с полностью замороженным склоном (гомогенная модель) и с ледяными включениями (гетерогенная модель). Получены зависимости начала таяния берегового склона от его начальной температуры при разных температурах водного потока, подтверждённые данными лабораторного эксперимента. В результате проведения лабораторных и численных экспериментов были получены новые, практически важные выводы об особенностях распространения примесей в деформируемых и неде-

формируемых руслах. Показано влияние формы поперечного сечения деформируемого русла на распространение примеси. Выдвинуто предположение, что существует такая форма сечения, при которой его деформации приводят к более интенсивному переносу примеси, чем в недеформируемом потоке. Подробно исследовано влияние расположения источника загрязнения в потоке на распространение примеси. Проведена оценка вклада различных частей потока в перенос примеси. Исследование воздействия термической и механической эрозии, вызванной таянием ледяных пластов, включённых в береговой откос, на распространение примеси, позволило сделать вывод о том, что в результате формирования таликов, заполняемых потоком, переносящим примесь, условия равномерности потока нарушаются, приводя к нестационарности распространения примеси. При этом увеличение объёма исследуемого участка за счёт появления полостей в береговом откосе приводит к увеличению концентрации примеси.

### **Заключение**

В настоящее время в лаборатории активно развиваются все традиционные основные направления, и особенно исследования, связанные с криолитозоной. Особое внимание уделяется изучению экологических аспектов: катастрофических наводнений, вызванных ледовыми затруднениями, взаимодействию морских и пресных вод в устьевых областях северных рек, распространению загрязнений в руслах, подверженных термической и механической деформации. Новым направлением является изучение деформационных процессов на повороте русел, берега которых сложены многолетнемерзлыми породами.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Бреховских В.Ф., Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Мордасов М.А. Исследование процессов распространения загрязняющих веществ в приливных устьях северных рек // Вод. ресурсы. Т. 2, №5, 1997. С 532–536
2. Воды суши: проблемы и решения. Отв. ред. акад. РАН М.Г. Хубляян. М.: ИВП РАН. 1994. 560 с.
3. Грицук И.И., Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К. Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемёрзлых пород // Лёд и снег. №3 (119), 2012. С. 73–78

4. Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарёв Н.К., Синиченко Е.К. Лабораторное исследование снеготаяния как составляющей сезонного процесса деформаций русла // Вестник РУДН (Инженерные исследования). №3, 2013. С. 83–91
5. Грицук И.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарёв Н.К., Синиченко Е.К. Экспериментальное исследование влияния солнечной радиации на интенсивность снеготаяния // Вестник РУДН (Инженерные исследования) №1, 2015. С. 83–90
6. Гришин Н.Н. Механические свойства ледяного покрова рек. М.: ИВП АН, 1979.
7. Дебольская Е.И. Динамика водных покровов под ледяным покровом, М.: Изд. ИВП РАН и МГУП, 2003. 279 с.
8. Дебольская Е.И. Математические модели ледовых заторов и их последствий. Монография под ред. В.К. Дебольского. М.: Изд. РУДН, 2014. 107 с.
9. Дебольская Е.И. Численное моделирование турбулентной структуры подледных потоков // Водные ресурсы. Т. 27, №2, 2000. С. 167–174
10. Дебольская Е.И. Математическая модель русловых деформаций рек криолитозоны // Водные ресурсы. Т. 41, №5, 2014. С. 496–506
11. Дебольская Е.И. Моделирование русловых деформаций, вызванных волновым и термическим воздействием, на реках криолитозоны. Труды VIII Международной конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей» М., 2014. С. 61–69
12. Дебольская Е.И., Грицук И.И., Дебольский В.К., Ионов Д.Н., Масликова О.Я. Влияние береговых деформаций на распространение примесей в реках криолитозоны (лабораторное и математическое моделирование) // Водные ресурсы. Т. 44, № 5, 2017.
13. Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Грицук И.И., Масликова О.Я., Ионов Д.Н. Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды // Лёд и Снег.. №1 (121), 2013. С. 104–111.
14. Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я. Математическое моделирование деформаций дна в покрытых льдом нестационарных потоках // Водные ресурсы. Т. 33, №1, 2006. С.29–38.
15. Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ермаков А.В. Влияние ледяного покрова на деформации дна в нижних бьефах // Водные ресурсы. Т. 35, №6, 2008. С. 663–670.
16. Дебольская Е.И., Дербенев М.В., Масликова О.Я. Численное моделирование ледовых заторов // Водные ресурсы. №5, 2004, С. 533–539.
17. Дебольская Е.И., Долгополова Е.Н., Решетков А.Б. Экспериментальные исследования структуры подледного течения // Водные ресурсы. . Т. 26, №1, 1999. С. 96–103
18. Дебольская Е.И., Масликова О.Я., Котляков А.В., Артемьев С.А. Одномерная и двухмерная модели динамики русла в нижних бьефах ГТС в условиях формирования ледовых заторов //Материалы гляциологических исследований. №105, М., 2008. С. 188–195

19. Дебольская Е.И., Масликова О.Я., Исаенков А.Ю. Математическое моделирование деформаций русла в нижних бьефах ГЭС, расположенных в криолитозоне, при катастрофических наводнениях в условиях ледовых затруднений // Природообустройство. №3, 2010. С. 51–58.
20. Дебольский В. К., Дебольская Е.И., Котляков А.В., Дербенев М.В., Замятина Э.В. Современная пространственно-временная изменчивость ледовых явлений в устьевых областях рек российской Западной Арктики // Известия РАН. Серия географическая. №2, 2008. С. 36–42
21. Дебольский В.К., Дебольская Е.И., Масликова О.Я. Двухмерная модель русловых деформаций в условиях формирования ледовых затоплений // Гидротехническое строительство. №5, 2009. С. 41–45
22. Долгополова Е.Н. Условия образования бора и его влияние на перенос осолонённых вод в устьях рек // Водные ресурсы. Т.40, №1, 2013. С. 1–17.
23. Долгополова Е.Н. Закономерности движения вод и наносов в устье реки эстуарно-дельтового типа на примере р. Енисей // Водные ресурсы. Т. 42, №2, 2015. С. 198–207
24. Долгополова Е.Н., Котляков А.В. Многолетнемерзлые породы в устьевых областях арктических рек России // Лёд и Снег. Т. 113, №1, 2011. С. 81–92)
25. Ионов Д.Н., Грицук И.И. Исследование деформаций берегов, сложенных многолетнемёрзлыми грунтами, на лабораторной модели // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. 2014. С. 403–411.
26. Котляков А.В., Грицук И.И., Масликова О.Я., Пономарев Н.К., Экспериментальное исследование влияния льдистости грунтов, слагающих русло рек, на динамику берегового склона // Лёд и снег. №2 (114), 2011. С.92–98
27. Масликова О.Я., Экспериментальное исследование интенсивности снеготаяния на лабораторной модели // Природообустройство. №1, 2016. С. 28–33
28. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука, 1980. 216 с.
29. Debolskaya E. A mathematical model of reservoir and river bank deformations in permafrost regions under simultaneous effect of the waves and warming. Engineering Geology for Society and Territory. Springer International Publishing. Switzerland Vol. 3. 2014. P. 98–103.
30. Dolgopolova E. Vertical transfer in ice-covered channel flow // Proc. 19-th IAHR Inter. Symp. On Ice. V. I, Vancouver, Canada. 2008. P. 531–542
31. Dolgopolova E. Scales of mixing processes in rivers // XXX IAHR Congress, Water Engineering and Research in a Learning Society: Modern Developments and Traditional Concepts. Thessaloniki. Greece. 2003. P. 317–323.
32. Elder J.W. The dispersion of Marked Fluid in Turbulent Dhear flow. J. Fluid Mech., Vol. 5, No.4, 1959.
33. Pariset E., Hauser R., Cagnon A. Formation of Ice Cover and Ice Dams in River. IHD ASCF V. 92, №6, 1966. P. 66–79

# **Нелинейная волновая диффузия в геосредах: пампинг-эффект**

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-05-00209а)

*В.Н. Зырянов*

Впервые задача математической физики гидросферы о нелинейной волновой диффузии для процессов, описываемых нелинейными параболическими уравнениями типа уравнения теплопроводности, была рассмотрена J.R. Philip [30]. Он показал, что в чисто периодических диффузионных процессах из-за их нелинейности возникает остаточный эффект – эффект накопления субстанции внутри области. В качестве приложения он рассмотрел периодическую задачу о безнапорной фильтрации грунтовых вод для уравнения Бессенеска. Независимо от этой работы на аналогичный остаточный эффект, но уже в динамике приливных волн на мелководье, вышли авторы работы [12] в результате экспериментальных исследований эволюции приливных волн в Белом море.

Полная теория этого явления для общего случая квазилинейных параболических уравнений была развита в работе [13], в которой для этого явления был предложен термин «пампинг-эффект», т.е. эффект накачки. Последующие исследования диффузионных процессов в различных геосредах показали, что пампинг-эффект имеет всеобъемлющий характер и проявляется во многих средах. На сегодняшний день имеется целый ряд интересных результатов по пампинг-эффекту. Данная статья посвящена обзору проявления этого эффекта в различных геосредах. Довольно полный обзор типов параболических уравнений, к которым применима теория пампинг-эффекта, приведён в статье [35].

Развитая в [13] теория пампинг-эффекта была использована в исследованиях нелинейных эффектов трансформации приливных волн на мелководье [7, 9], в построении теории соленоидного клина в приливных устьях рек [6], в предсказании эффекта антипотепления глубинных вод Мирового океана [8], в описании интрузии морских вод в береговые подземные горизонты в приливных морях [10, 14, 21], в задаче Стефана о росте льда [11].

Спектр физических процессов в природе, описываемых нелинейными параболическими уравнениями типа уравнения теплопроводности с коэффициентом теплопроводности, являющимся

функцией искомой характеристики среды, довольно широк. Хотя этот класс уравнений называется уравнением теплопроводности, он встречается при описании совершенно различных процессов. Общая форма этих уравнений имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = b \operatorname{div}[F(T) \operatorname{grad} T], \quad (\text{B. 1})$$

где  $b$  – некоторая константа, а функция среды  $F(T)$  имеет различные зависимости для разного класса задач. Наиболее часто  $F(T)$  описывается степенной функцией  $F(T)=T^n$ . Например, при  $n=1$  уравнение (B. 1) описывает динамику безнапорной фильтрации в пористых средах [20],  $T$  в этом случае является уровнем грунтовых вод; при  $n \geq 1$  – фильтрацию политропного газа в пористых средах [5, 16, 29], давление  $P$  и плотность  $\rho$  которого связаны уравнением  $P=\text{const } \rho^n$  ( $n$  – показатель политропы), в этом случае  $T$  является плотностью газа  $\rho$ ; при  $n=3$  – динамику тонкого слоя жидкости, стекающего под действием силы тяжести [23], растекание магматической лавы по горизонтальной плоскости, эволюцию длинных гравитационных волн типа приливных на мелководье [7, 12, 27]; при  $n=6$  – радиационное рассеяние волн Маршака [5, 26].

Много статей посвящено изучению автомодельных и инвариантно-групповых решений уравнения (B. 1). В частности, Г.И. Баренблatt [2] получил автомодельные решения первого и второго рода (неполная автомодельность по терминологии Баренблатта) для (B. 1). Однако автомодельные решения относятся к задачам Коши с начальными условиями или к краевым задачам, но со специфическими граничными условиями. В данной статье будет описан эффект, возникающий в периодической краевой задаче для параболического уравнения нелинейной теплопроводности (B. 1).

## 1. Теория пампинг-эффекта

Будем рассматривать одномерный аналог уравнения (B. 1). Именно для одномерного уравнения удалось найти один важный инвариант. Рассмотрим периодическую задачу для одномерного уравнения (B. 1) на полуправой  $x > 0$  с граничными условиями

$$T|_{x=0}=f(t), \quad T|_{x \rightarrow 0} < C < \infty, \quad (1.1)$$

где  $f(t)$  – периодическая функция с периодом  $\tau$  или с частотой  $\omega=2\pi/\tau$ . Обычно  $f(t)$  имеет вид  $f(t)=T_0+T_1 \cos \omega t$ . Очевидно, что в отсутс-

тивие колебаний на границе ( $T_1=0$ ) функция  $T=T_0$  будет решением уравнения (B. 1).

Введём оператор осреднения по периоду

$$\langle T \rangle = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} T dt. \quad (1.2)$$

Пусть  $\Psi(T)$  – первообразная функция от  $F(T)$ , т.е.

$$\Psi(T) = \int F(T) dT. \quad (1.3)$$

Будем предполагать, что  $\Psi(T)$  – однозначная функция. Обозначим обратную к  $\Psi$  функцию как  $\Psi^{(-1)}$ . Тогда справедлива основная теорема [13]:

периодическое решение уравнения (B. 1) с граничными условиями (1.1) стремится при  $x \rightarrow +\infty$  к константе  $T(\infty)$ :

$$T(\infty) = \Psi^{(-1)}[\sigma \Psi(f(t))\tau], \quad (1.4)$$

вообще говоря, не совпадающей с  $T_0$ . Величина  $\sigma \Psi(T)\tau$  является инвариантом, т.е. имеет одно и то же значение на всей полуоси  $x > 0$ .

Из теоремы следует, что чисто гармоническое колебание характеристики среды  $T$  на границе области приводит к увеличению или уменьшению ее значения внутри области относительно ее среднего значения на границе. Следовательно, возникает эффект либо накачки, либо, наоборот, откачки субстанции на бесконечности гармоническими колебаниями на границе. Этот эффект в [13] предложено назвать пампинг-эффектом. Разность  $T^{(\pm)} = T(\infty) - T_0$  даёт количественное значение пампинг-эффекта. Знак  $\pm$  в верхнем индексе означает, что эта величина может быть как положительной, так и отрицательной. В случае линейного уравнения (B. 1) при  $F(T)=\text{const}$  очевидно, что  $T(\infty)=T_0$  и никакого пампинг-эффекта не возникнет.

Доказательство теоремы опирается на предположение, что решение уравнения (B. 1) с граничными условиями (1.1) может содержать только кратные щ частоты. Справедливость этого предположения может быть обоснована аналитически для случая малых значений отношения  $\varepsilon = T_1/T_0$  в выражении для  $f(t)$ , т.е. при  $\varepsilon \ll 1$ . Предположим, что  $\Psi(T)$  – аналитическая функция, и разложим её в ряд Тейлора в окрестности  $T_0$ . Тогда уравнение (B. 1) можно записать в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( F(T_0) + \frac{dF(T_0)}{dT} \varepsilon T + \frac{1}{2} \frac{d^2F(T_0)}{dT^2} \varepsilon^2 T^2 + \dots \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right]. \quad (1.5)$$

Будем искать решение уравнения (1.5) в виде асимптотического ряда по  $\epsilon$ :

$$T=T^{(0)}+\epsilon T^{(1)}+\epsilon^2 T^{(2)}+\dots \quad (1.6)$$

Подставляя (1.6) в (1.5) и группируя члены нулевого, первого и т.д. порядков по  $\epsilon$ , получим систему редуцированных линейных неоднородных уравнений теплопроводности, которые будут содержать только кратные щ частоты.

Легко найти значение инварианта  $\langle \Psi \rangle$  на бесконечности, так как. колебания там затухают. Но на практике такая задача чаще встречается для ограниченных областей  $0 \leq x \leq L$  и процедура нахождения значения инварианта, описанная выше, не проходит для отрезка. В общем случае решение уравнения (B. 1) на отрезке может быть найдено только численно. Однако, если отношение  $\epsilon = T_1/T_0$  в выражении для  $f(t)$  – малая величина, т.е.  $\epsilon \ll 1$ , то можно найти аналитическое выражение для пампинг-эффекта. С этой целью рассмотрим уравнение (1.5) и ограничимся в  $F(T)$  только членами не выше первого порядка по  $\epsilon$ :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\alpha + \beta \epsilon T + O(\epsilon)) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1.7)$$

где  $\alpha = F(T_0)$ ,  $\beta = dF(T_0)/dT$ . На правом конце отрезка поставим условие второго рода:

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = 0, \quad (1.8)$$

которое физически означает отсутствие потока субстанции через границу. Будем искать решение уравнения (1.7) с граничными условиями (1.1), (1.8) в виде асимптотического ряда (1.6) с граничными условиями для членов ряда:

$$T^{(0)} \Big|_{x=0} = A \cos \omega t, \quad \frac{\partial T^{(0)}}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad T^{(1)} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0. \quad (1.9)$$

Решение для первого приближения  $T^{(0)}$  ищем в виде

$$T^{(0)} = \operatorname{Re} [Q(x)e^{i\omega t}] = \frac{Q(x)e^{i\omega t} + Q^*(x)e^{-i\omega t}}{2}, \quad (1.10)$$

где  $\operatorname{Re}$  – действительная часть выражения в скобках, а звездочка – комплексно сопряженная функция. Подставляя (1.10) в первое приближение уравнения (1.7), получим выражение для  $Q(x)$ :

$$Q(x) = T_1 \frac{\operatorname{ch}[\lambda(L-x)]}{\operatorname{ch}(\lambda L)}, \quad (1.11)$$

где  $\lambda = (1+i)\sqrt{\omega/(2\alpha)}$ . Подставляя (1.11) в (1.10) и затем во второе приближение уравнения (1.7) относительно  $e$ , получим решение для  $T^{(1)}$ , содержащее периодическую часть и независящее от времени слагаемое. Стационарное слагаемое и описывает пампинг-эффект

$$T^{(\pm)}(x) = -\frac{\beta}{4\alpha} [Q(x)Q^*(x) - Q(0)Q^*(0)]. \quad (1.12)$$

Выражение (1.12) дает количественное значение величины пампинг-эффекта в любой точке  $x$  отрезка. На конце отрезка  $x=L$  величина пампинг-эффекта будет

$$T^{(\pm)}(L) = -\frac{\beta T_1^2}{4\alpha} \left[ \frac{1}{\operatorname{ch}(\lambda L) \operatorname{ch}(\lambda^* L)} - 1 \right]. \quad (1.13)$$

При  $L \rightarrow \infty$  получим

$$T^{(\pm)}(\infty) = -\frac{\beta T_1^2}{4\alpha}. \quad (1.14)$$

Из (1.4) видно, что знак пампинг-эффекта зависит от знака  $\beta/\alpha$ .

Из соотношения (1.12) можно оценить расстояние  $L_{(+)}$ , на котором среднее значение искомой функции выходит на асимптотическое решение (1.13),

$$L_{(+)} = \frac{1}{\lambda + \lambda^*} = [2 \operatorname{Re}(\lambda)]^{-1} = \left( \frac{\alpha}{2\omega} \right)^{1/2} = \left[ \frac{F(T_0)}{2\omega} \right]^{1/2}. \quad (1.15)$$

Итак, если функция среды  $F(T)$  в (B. 1) есть линейная функция  $F(T)=\alpha+\beta T$ , то будем иметь выражение для пампинг-эффекта на бесконечности [9]:

$$T^{(\pm)} = -b \pm \sqrt{b^2 + T_1^2/2}, \text{ где } b = \alpha/\beta + T_0. \quad (1.16)$$

Если  $b < 0$ , необходимо брать минус в (1.16), если  $b > 0$ , то знак плюс. При  $T_1/b \ll 1$  и  $\alpha/\beta \gg T_0$  соотношение (1.16) упрощается и переходит в (1.14).

На рис. 1 приведены результаты численного решения уравнения (1) с безразмерной функцией  $F(T)$  в виде

$$F(T) = ca/(b+rT) \quad (1.17)$$

где  $c=10$ ,  $a=2,25$ ,  $b=1$ ,  $r=0,596$ . Задание функции  $F(T)$  в виде (30) связано с приложением пампинг-эффекта к океанам и озёрам, которое будет изложено ниже. На границе при  $x=0$  ставится периодическое условие  $T=1+q(t)\sin t$ , на конце отрезка  $x=5$  задаётся отсутствие потока через границу. Функция  $q(t)$  задаётся следующим образом: она равняется 0,2 при  $0 < t < 200$  (первый режим), затем линейно меняется

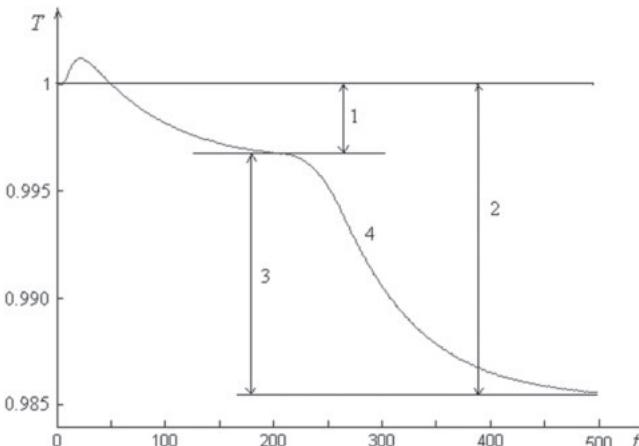


Рис. 1. Поведение температуры  $T$  во времени в придонной области модельного бассейна после увеличения амплитуды колебания температуры на поверхности водоёма в два раза (модельный численный расчёт, все величины безразмерные). Объяснения обозначений 1–4 даны в тексте

от 0,2 до 0,4 при  $200 < t < 250$  и далее остаётся равной 0,4 при  $250 < t < 500$  (второй режим). Таким поведением функции  $q(t)$  моделировалась ситуация в океане, когда амплитуда колебания температуры поверхности океана или озера вначале некоторое время держится на одном значении, а затем линейно переходит на другое значение, в данном случае – в два раза большее предыдущего. Как видно из результатов численного счёта, температура в глубинных слоях сначала выходит на один асимптотический уровень (кривая 4 на рис. 1), соответствующий первому режиму (уровень 1), а затем, когда амплитуда колебания температуры на поверхности океана  $x=0$  увеличивается вдвое, переходит на второй асимптотический уровень, соответствующий второму режиму (уровень 2). Потеря тепла будет определяться разностью между уровнями 1 и 2 (интервал 3). В данном случае пампинг-эффект отрицательный.

Нетрудно сделать общий вывод из физики процесса – пампинг-эффект будет положительным, если  $F(T)$  в (1) – возрастающая функция, и отрицательным, если она убывающая, как, например, (30). Действительно, выражение в скобках в уравнении (1) есть поток тепла. Для возрастающей функции  $F(T)$  на фазе верхней части синусоиды хода температуры поток тепла внутрь области будет больше, нежели на фазе нижней части синусоиды хода температуры. В

результате возникает остаточный поток тепла, который будет ненулевым и направленным внутрь области. В этом случае возникает положительный пампинг-эффект. Аналогичные физические рассуждения для случая убывающей функции  $F(T)$  приводят к отрицательному пампинг-эффекту.

## 2. Пампинг-эффект в динамике приливных волн на мелководье

В прибрежных зонах морей, в вершинах заливов и эстуариев глубины, как правило, уменьшаются и становятся сравнимыми с толщиной слоя Стокса  $h_{st} = \sqrt{K_z \tau}$  ( $K_z$  – кинематический коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $\tau$  – характерный временной масштаб движений (период волны)). При глубинах меньше толщины слоя Стокса трение становится доминирующим. Кроме того, начинает сильно проявляться нелинейность – амплитуда приливного колебания уровня становится сравнимой с глубиной, в результате линейные приближения становятся неприменимыми. Колебания свободной поверхности описываются нелинейным параболическим уравнением [7, 12] для возвышения уровня  $\zeta$ :

$$\zeta_t = \frac{g}{3K_z} \nabla [(h + \zeta)^3 \nabla \zeta], \quad (2.1)$$

где  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$  – оператор Гамильтона,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h(x, y)$  – невозмущённая глубина моря. Одномерный аналог уравнения (2.1) будет иметь вид одномерного уравнения (B. 1) с  $F(\zeta) = \frac{g}{3K_z} (h + \zeta)^3$ . Движение рассматривается в вертикальной плоскости, перпендикулярной к берегу. Колебания уровня на внешней глубоководной границе мелководной зоны задается приходящей приливной волной  $\zeta = \zeta_0 \sin \omega t$ ,  $\omega = 2\pi/\tau$ . При  $h = \text{const}$  получим следующее выражение для инварианта

$$(h + \zeta^{(+)})^4 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau (h + \zeta_0 \sin \omega t)^4 dt. \quad (2.2)$$

Вычисляя интеграл в (2.2), получим значение пампинг-эффекта для приливного уровня на бесконечности

$$\zeta^{(+)} = h \left\{ \left[ 1 + 3 \left( \frac{\zeta_0}{h} \right)^2 + \frac{3}{8} \left( \frac{\zeta_0}{h} \right)^4 \right]^{1/4} - 1 \right\}. \quad (2.3)$$

Из (2.3) видно, что величина пампинг-эффекта для приливных волн будет положительной, т.е. средний уровень увеличивается на

мелководье под действием прилива. В случае малости отношения амплитуды приходящей волны прилива  $\zeta_0$  к глубине  $h$  (т.е. при  $\epsilon = \zeta_0/h < 1$ ), выражение (2.3) упрощается

$$\zeta^{(+)} \approx \frac{3}{4} \frac{\zeta_0^2}{h}. \quad (2.4)$$

Как видно из (2.4), средний уровень приливного колебания повышается при приближении к берегу. В устьях рек, впадающих в приливные моря, пампинг-эффект приводит к перемещению зоны подпора вглубь реки.

Опишем этот пампинг-эффект применительно к воронкообразным заливам (эстуариям). Приведём уравнение (2.1) к безразмерному виду. Для этой цели введем безразмерные параметры со штрихом:

$$\zeta = \tilde{\zeta}_0 \zeta', \quad t = \tau_0 t', \quad h = H_0 h', \quad (x, y) = L(x', y'). \quad (2.5)$$

Подставляя (2.5) в (2.1) и опуская далее штрихи, получим уравнение (2.1) в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \bar{A}(\nabla, (h + \epsilon \zeta)^3 \nabla \zeta), \quad (2.6)$$

где  $\bar{A} = \frac{g T_0 H_0^3}{3 A L^2}$ ,  $\epsilon = \zeta_0/H_0$  – отношения амплитуд прилива к глубине жидкости. Будем считать пока  $\epsilon$  малой величиной. Переайдём к полярным координатам с полюсом в вершине залива. Считаем, что по угловой координате  $\phi$  уровень меняется мало, тогда зависимостью  $\zeta$  от  $\phi$  можно пренебречь. В результате будем иметь нелинейное уравнение

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \bar{A} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r(h + \epsilon \zeta)^3 \frac{\partial \zeta}{\partial r} \right). \quad (2.7)$$

Будем искать решения (2.7) в виде асимптотического ряда по малому параметру  $\epsilon$

$$\zeta = \zeta_0 + \epsilon \zeta_1 + \dots \quad (2.8)$$

Подставляя (2.8) в (2.7), получим уравнения для первого и второго приближений по  $\epsilon$ :

$$\frac{\partial \zeta_0}{\partial t} = \bar{A} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r H^3 \frac{\partial \zeta_0}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial \zeta_1}{\partial t} = \bar{A} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r H^3 \frac{\partial \zeta_1}{\partial r} + \frac{3}{2} r H^2 \frac{\partial \zeta_0^2}{\partial r} \right). \quad (2.9)$$

Границные условия:

на внешней границе мелководной зоны ( $r=R$ ) залива задаётся входящая приливная волна с амплитудой  $q$ , а в вершине ( $r=0$ ) твёрдая стенка:

$$\zeta \Big|_{r=R} = q e^{i\omega t}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (2.10)$$

Соответственно, для  $\zeta_0$  и  $\zeta_1$  будем иметь граничные условия:

$$\zeta_0 \Big|_{r=R} = \frac{q}{\zeta_0} e^{i\omega t}, \quad \frac{\partial \zeta_0}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \zeta_1 \Big|_{r=R} = 0, \quad \frac{\partial \zeta_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (2.11)$$

Ищем волновые решения системы (2.9). Для первого приближения  $\zeta_0$  получим решение первого уравнения системы (2.9)

$$\zeta_0 = \frac{q}{\zeta_0} \left[ \frac{J_0(kr)}{J_0(kR)} e^{i\omega t} + \text{conj} \right], \quad (2.12)$$

где  $k = \sqrt{\frac{i\omega}{Ah^3}}$ ,  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $\text{conj}$  – комплексно сопряжённое выражение первого слагаемого.

Для нахождения следующего приближения  $\zeta_1$  необходимо выражение (2.12) подставить во второе уравнение (2.9). Заметим, что при возведении выражения (2.12) в квадрат получим два волновых члена и стационарный член в виде удвоенного произведения слагаемых в (2.12):

$$2 \frac{J_0(kr)J_0(k^*r)}{J_0(kR)J_0(k^*R)}. \quad (2.13)$$

Волновые слагаемые решения уравнения (2.9) для  $\zeta$  при осреднении по периоду волны дадут ноль, а остаточный подъём уровня, пампинг-эффект, будет определяться выражением (2.13) в правой части уравнения (2.9): В результате интегрирования получим

$$\zeta_1 = \frac{3q^2}{\zeta_0^2 h} \left[ \frac{J_0(kr)J_0(k^*r)}{J_0(kR)J_0(k^*R)} - 1 \right]. \quad (2.14)$$

Или в размерной форме:

$$\zeta^{(+)} = \varepsilon \tilde{\zeta}_0 \zeta_1 = \frac{3q^2}{h} \left[ \frac{J_0(\tilde{kr})J_0(\tilde{k}^*r)}{J_0(\tilde{k}R)J_0(\tilde{k}^*R)} - 1 \right], \quad (2.15)$$

где  $\tilde{k} = \sqrt{\frac{3i\omega A}{gh^3}}$ . В вершине залива при  $r=0$  величина пампинг-эффекта в обозначениях формулы (2.4) будет равна

$$\zeta^{(+)} = \frac{3\zeta_0^2}{h} \left[ \frac{J_0(\tilde{kr})J_0(\tilde{k}^*r)}{J_0(\tilde{k}R)J_0(\tilde{k}^*R)} - 1 \right], \quad (2.16)$$

где  $\zeta_0$  – амплитуда прилива на входе в бухту.

### 3. Пампинг-эффект в процессах интрузии морских вод в устья приливных рек

Солёная морская вода проникает в устья рек в придонном слое в виде клина солёных вод. Динамика солёностного клина в двухслойной модели в канале постоянной глубины  $H_0$  меньшей толщины слоя Стокса, описывается системой двух нелинейных параболических уравнений для свободной поверхности  $z=\zeta(t, x)$  и толщины нижнего слоя  $z=\eta(t, x)$  [6]

$$\begin{aligned}\frac{\partial \zeta}{\partial t} &= \gamma \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (H_0 - \zeta)^3 \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \delta \frac{\partial \eta}{\partial x} (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) \right\}, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \gamma \delta \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \eta^3 \left( 4 - \frac{3\eta}{H_0} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x} - \delta^{-1} \frac{\partial \zeta}{\partial x} (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) \right\}.\end{aligned}\quad (3.1)$$

В (3.1)  $\gamma=g/(3A_z)$ ,  $\delta=\Delta\rho/\rho_1$ ,  $A_z$  – кинематический коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\Delta\rho$  – разность плотностей морской и речной воды,  $\rho_1$  – плотность речной воды.

На входе в устье задаются периодические колебания уровня и толщины нижнего слоя морской воды

$$x=0: \zeta=\zeta_0 \cos \omega t, \eta=\eta_0 \cos \omega t+D,$$

где  $D$  – средняя толщина нижнего слоя на входе в канал.

Оценим величину пампинг-эффекта для свободной поверхности и поверхности раздела слоев  $\zeta_\infty^+$  и  $\eta_\infty^+$ . Для этого запишем систему (3.1) в виде

$$\begin{aligned}\frac{\partial \zeta}{\partial t} &= \gamma \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ -\frac{1}{4} (H_0 - \zeta)^4 - \delta \left( H_0 \eta^3 - \frac{\eta^4}{2} \right) \right], \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \gamma \delta \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ \left( \eta^4 - \frac{3}{5H_0} \eta^5 \right) - \frac{1}{\delta} \int_0^x (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) \frac{\partial \zeta}{\partial x} dx \right].\end{aligned}\quad (3.2)$$

Применяя оператор осреднения (1.2) к (3.2) и интегрируя дважды по  $x$ , получим систему:

$$\begin{aligned}\frac{1}{4} \langle (H_0 - \zeta)^4 \rangle + \delta \langle H_0 \eta^3 - \eta^4/2 \rangle &= C_1 x + C_2, \\ \left\langle \eta^4 - \frac{3}{5H_0} \eta^5 \right\rangle - \frac{1}{\delta} \left\langle \int_0^x (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) \frac{\partial \zeta}{\partial x} dx \right\rangle &= C_3 x + C_4.\end{aligned}\quad (3.3)$$

Из условия ограниченности уровня  $\zeta$  и толщины нижнего слоя  $\eta$  при  $x \rightarrow +\infty$  следует, что  $C_1 = C_3 = 0$  в (3.3). Таким образом, выражения в левой части системы (3.3) являются инвариантами относительно

сдвигов по оси  $X$  вдоль канала. Вычисляя эти инварианты на входе в канал и в бесконечно удалённой точке, где колебания затухают, получим систему уравнений для определения  $\zeta_\infty^+$  и  $\eta_\infty^+$ :

$$\begin{aligned} & (H_0 - \zeta_\infty^+)^4 + \delta \left( H_0 - \frac{1}{2} \eta_\infty^\pm \right) (\eta_\infty^\pm)^3 = \\ &= \frac{1}{4} \left\langle (H_0 - \zeta(0, t))^4 \right\rangle + \delta \left\langle H_0 \eta^3(0, t) - \frac{\eta^4(0, t)}{2} \right\rangle, \\ & (\eta_\infty^\pm)^4 - \frac{3}{5H_0} (\eta_\infty^\pm)^5 = \left\langle \eta^4(0, t) - \frac{3}{5H_0} \eta^5(0, t) \right\rangle + \\ &+ \frac{1}{\delta} \left\langle \int_0^{+\infty} \frac{\partial \zeta}{\partial x} (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) dx \right\rangle \end{aligned} \quad (3.4)$$

Из первого уравнения системы (3.4) видно, что с точностью до  $O(\delta)$  мы будем иметь для  $\zeta_\infty^+$  соотношение (2.4):

$$\zeta_\infty^+ = \frac{3\zeta_0^2}{4H_0} (1+O(\delta)), \quad (3.5)$$

т.е. наличие двухслойности даёт в выражении (3.5) поправку порядка  $O(\delta)$ . Труднее обстоит дело с оценкой  $\eta_\infty^\pm$  из-за наличия в правой части (3.4) нелокального члена

$$J = \left\langle \int_0^{+\infty} \frac{\partial \zeta}{\partial x} (3H_0 \eta^2 - 2\eta^3) dx \right\rangle. \quad (3.6)$$

Однако тот факт, что в двухслойной жидкости накачка уровня  $\zeta_\infty^+$  практически такая же, как и в однородной, позволяет вычислить выражение (3.6), воспользовавшись для нахождения  $\partial \zeta / \partial x$  результатами однородной модели. В однородном случае ( $\delta=0$ ) решение первого уравнения (3.2) в случае малых величин  $\alpha=\zeta_0/H$  можно представить в виде асимптотического ряда по  $\alpha$ :

$$\zeta = \zeta_0 \sum_{k=0}^{+\infty} \alpha^k \zeta_k(x, t). \quad (3.7)$$

Подставляя (3.7) в первое уравнение (3.2) при  $\delta=0$  и ограничиваясь только двумя членами асимптотического ряда (3.7), получим с точностью до  $O(\delta^2)$ :

$$\begin{aligned} \zeta = \zeta_0 \operatorname{Re} \{ i \exp[-(1+i)kx + iw t] - \frac{3\alpha}{4} [(1+i) - \exp(-2kx + 2\pi i)] - \\ - 2 \exp[-2(1+i)kx + 2i\omega t] - 2 \exp[-(1+i)k\sqrt{2x + 2i\omega t}] \} + O(\alpha)^2, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где  $k = \sqrt{\frac{6\omega A_z}{gH_0^3}}$  – волновое число.

Дифференцируя (3.8) по  $x$  и подставляя в (3.6), получим сумму интегралов Лапласа вида

$$I(t) = \int_0^\infty e^{-vkx} f(x, t) dx. \quad (3.9)$$

Для полусуточной приливной волны  $M_2$  при глубинах, меньших толщины слоя Стокса,  $H \leq h_{St} = \sqrt{A_z T_0}$  величина  $kL \gg 1$ , где  $L$  – характерный пространственный масштаб движений. Тогда для вычисления интеграла (3.9) можно воспользоваться его асимптотикой [18] при  $k \rightarrow +\infty$ :

$$I(t) \sim \sum_{s=0}^{+\infty} (vk)^{-s-1} \left. \frac{\partial^s f}{\partial x^s} \right|_{x=0}. \quad (3.10)$$

Ограничившись первым членом асимптотического ряда (3.10), получим для (3.6)

$$J \approx V_0 \left\langle 3H_0 \eta^2(0, t) - 2\eta^3(0, t) \left( -\frac{3\alpha}{4} + \sin \omega t \right) \right\rangle. \quad (3.11)$$

Подставляя в (3.11) граничное условие для  $\eta$  и выделяя пампинг-эффект нижнего слоя  $\Delta\eta_\infty^\pm = \eta_\infty^\pm - D$ , получим из второго уравнения (3.4) приближённую формулу

$$\Delta\eta_\infty^\pm \approx \frac{3\beta^2(H_0 - D)D}{4H_0 - 3D} + \delta^{-1} \frac{3\alpha H_0^2 [(4\beta - 3\alpha)H_0 + (2\alpha - 4\beta)D]}{4D(4H_0 - 3D)}, \quad (3.12)$$

где  $\beta = \eta_0/D$ ,  $\alpha = \zeta_0/H_0$ .

Из (3.12) видно, что на величину пампинг-эффекта в нижнем слое влияет знак выражения:

$$G = (-3\alpha + 4\beta)H_0 + (2\alpha - 4\beta)D.$$

При  $G > 0$  будем иметь положительную накачку ( $\Delta\eta_\infty^+ > 0$ ), при  $G < 0$  и  $\delta\beta^2 D^2 (H_0 - D) + \alpha H_0^2 G < 0$  – отрицательную накачку ( $\Delta\eta_\infty^- < 0$ ). При  $\Delta\eta_\infty^+ \geq H_0 - D$  будем иметь вообще выклинивание верхнего слоя, т.е. нарушение двухслойности в горизонтальном канале. При отсутствии поверхностной волны ( $\alpha = 0$ ), для накачки нижнего слоя внутренней волной амплитуды  $\eta_0$  из (3.12) имеем выражение:

$$\Delta\eta_\infty^+ = \frac{3\eta_0^2(H_0 - D)}{D(4H_0 - 3D)}. \quad (3.13)$$

Итак, в зависимости от соотношения амплитуд поверхностной  $\zeta_0$  и внутренней  $\eta_0$  волн и отношения толщины верхнего слоя  $H_0$ – $D$  и нижнего  $D$  накачка нижнего слоя может быть положительная или отрицательная вплоть до возможного выклинивания верхнего либо нижнего слоя. На наклонной плоскости указанные эффекты будут способствовать либо увеличению длины солёностного клина, либо её уменьшению. Оценки величины пампинг-эффекта нижнего слоя, к примеру, для условий устья р. Онеги:  $H_0=8$  м,  $D=6$  м,  $\alpha=0,2$ ,  $\beta=0,3$ ,  $\delta=1,5 \times 10^{-2}$  дают  $\Delta\eta_{\infty}^+ \approx 23$  см.

Величина накачки нижнего слоя в отсутствие поверхности волны, как следует из (3.13), достигает своего максимума при  $D=2/3H_0$ , равного

$$\max(\Delta\eta_{\infty}^+) = \frac{3\eta_0^2}{4H_0}, \quad (3.14)$$

т.е. получается идентичная (2.4) формула; только теперь в числителе стоит амплитуда внутренней волны на входе в устье реки.

Итак, в устьях рек, впадающих в приливные моря, пампинг-эффект для свободной поверхности  $z=t(t, x)$  приводит к перемещению зоны подпора вод выше по реке, а для поверхности раздела слоёв  $z=z(t, x)$  приводит к увеличению длины солёностного клина и, как следствие, к более глубокому проникновению солёных морских вод в устья приливных рек. Численные расчёты показывают, что глубина проникновения солёных вод в устья приливных рек из-за пампинг-эффекта может быть существенно больше, чем в устья неприливных рек. Это отличие может составлять километры.

#### **4. Пампинг-эффект в процессах теплообмена с губинными слоями озёр, морей и океанов**

Интересно посмотреть, какую роль играет пампинг-эффект в передаче тепла в губинные слои морей, океанов и озёр. Как было показано в разделе 1 численным расчётом, тепло может не только закачиваться внутрь океана, но и наоборот, откачиваться из глубин в зависимости от того, увеличивается или уменьшается амплитуда колебания поверхностной температуры. Этот поток тепла из губинных слоёв океана из-за пампинг-эффекта будет повышать температуру поверхностных вод и вносить дополнительный вклад в общее потепление климата.

В настоящее время основной причиной потепления климата считается парниковый эффект, который связывают в основном с увеличением содержания двуокиси углерода в атмосфере. Но период потепления климата, помимо положительного тренда повышения глобальной температуры, характеризуется увеличением амплитуды годовых и многолетних колебаний температуры приземных слоёв атмосферы и поверхности Мирового океана. Солнечная радиация, безусловно, является основным внешним источником формирования климата Земли. Но сама вариация солнечной радиации мала и составляет 0,1–0,6% от её среднего значения. Это означает, что процессы внутреннего перераспределения потоков тепла в системе поверхность Земли – атмосфера играют главную роль в формировании изменений климата. Парниковый эффект является одним из таких внутренних причин климатических изменений. Пампинг-эффект также относится к внутренним процессам перераспределения тепла на Земле, закачивая в глубинные слои или откачивая из них тепло при изменении амплитуды колебаний температуры поверхности океана (ТПО). Как видно из результатов численного решения на рис. 1, при увеличении амплитуды колебания ТПО теплосодержание глубинных вод будет уменьшаться. В [4, 28] приводятся данные, подтверждающие охлаждение глубинных вод в Атлантике.

Дж. Рейд [31] нашел значимую корреляцию между потеплением климата и колебаниями ТПО. В [19] также подтверждается этот вывод по результатам анализа изменений ТПО в Атлантике за последние 50 лет. На рис. 2 приведён график колебаний ТПО в экваториальной зоне Атлантики, начиная с 1959 г.[19]. График базируется на инструментальных наблюдениях и спутниковых данных. Видно, что амплитуда многолетних колебаний ТПО начиная с 1960 г. увеличивается. К 2000 г. амплитуда колебания ТПО увеличилась на 1,5°C. Таким образом, амплитуда многолетних колебаний ТПО в Атлантике за период 1950–2000 гг. увеличилась примерно в 1,5 раза.

Осредним уравнение теплопроводности для Мирового океана по широте и долготе. Тогда распределение температуры воды по вертикали будет описываться одномерным уравнением нелинейной теплопроводности. Примем граничные условия в виде (1.1), где  $f(t)=T_0+T_1\cos\omega t$  Однако сразу получить уравнение (B. 1) не удается,

так как известно, что функция среды  $F(T)$ , или, точнее, коэффициент теплопроводности для океана, зависит от градиента температуры, а не от самой температуры, поэтому надо попытаться найти зависимость градиента температуры от самой температуры, с тем чтобы прийти к уравнению (B. 1). Функция теплопроводности для океана определяется процессами турбулентного перемешивания. Она на много порядков больше коэффициента молекулярной теплопроводности. Коэффициент вертикального турбулентного обмена в океане пропорционален коэффициенту обмена импульсом по вертикали  $K_z$ . Ниже поверхностного слоя Экмана для  $K_z$  в океанологии используется следующая параметризация [25, 32] с использованием частоты Вайсяля–Брента:  $N(z) = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}}$

$$K_z(z) = \mu N^{-\gamma}, \quad (4.1)$$

где  $\mu = \delta/N_0^{1-\gamma}$ ;  $\delta = (1/2) \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}^2$ ;  $0.5 \leq \gamma \leq 1.5$ ; и  $N_0$  – характерное значение частоты Вайсяля–Брента. Как отмечено в [25],  $\gamma=1$  – наиболее подходящее значение. В глубоководных слоях океана стратификация вод слабая и, следовательно,  $N(z)$  может оказаться очень малой величиной. В результате соотношение (4.1) будет давать сильно завышенные значения  $K_z$  в глубинных слоях. Чтобы избежать этого, в [33] предложена модификация соотношения (4.1) введением ограничения  $K_z \leq K_z^{\max}$ , и соотношение (4.1) более корректно можно записать в виде:

$$K_z(z) = \min(\mu N^{-\gamma}, K_z^{\max}). \quad (4.2)$$

Будем предполагать, что  $K_z \leq K_z^{\max}$ , следовательно, соотношение (4.1) справедливо для всей толщи океана. Но чтобы непосредственно применить изложенную теорию пампинг-эффекта, необходимо выразить  $K_z$  в зависимости не от градиента температуры, а непосредственно от самой температуры, т.е. в виде  $K_z = K(T)$ . Для этого воспользуемся результатами работы [17], в которой показано, что фоновое распределение частоты Вайсяля–Брента в открытом океане в геострофической области хорошо аппроксимируется гиперболической зависимостью

$$N(z) = h_E N_E / (z + h_E), \quad (4.3)$$

где  $h_E$  – толщина верхнего слоя трения Экмана,  $N_E$  – значение частоты Вайсяля–Брента на верхней границе геострофической области.

Аппроксимация (4.3) получена в результате статистической обработки большого количества данных непосредственных наблюдений за распределением плотности воды в различных точках Мирового океана. Заметим, что среднегодовое распределение частоты Вайсяля–Брента в Мировом океане изучалось в [24], но параметризации для  $N(z)$  не было предложено.

Учитывая (4.3), можно написать

$$N^2(z) = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} = \left( \frac{h_E N_E}{z + h_E} \right)^2. \quad (4.4)$$

В (4.4) использована стандартная аппроксимация частоты Вайсяля – Брента с заменой в знаменателе плотности  $\rho$  на среднее значение  $c_0$ . Интегрируя (4.4) от дна  $z=H$  до уровня  $z$ , получим

$$\frac{h_E^2 N_E^2}{z + h_E} = \frac{g}{\rho_0} (\rho(H) - \rho(z)) + \frac{h_E^2 N_E^2}{H + h_E}. \quad (4.5)$$

Подставляя  $h_E N_E / (z + h_E)$ , из (4.5) в (4.3) и затем в (4.1), получим

$$K(z) = \frac{\mu H_E^\gamma N_E^\gamma}{\left[ \frac{g}{\rho_0} (-\rho(z) + \rho(H)) + \frac{h_E^2 N_E^2}{H + h_E} \right]^\gamma}. \quad (4.6)$$

Считая поле солёности «замороженным» в океане, используем простейшее уравнение состояния морской воды в приближении Буссинеска:  $\rho = \rho_H (1 - \alpha_T (T - T_H))$ , где  $\alpha_T$  – коэффициент термического расширения воды,  $\rho_H = \rho(H)$  и  $T_H = T(H)$ . Тогда будем иметь окончательное выражение для функции температуропроводности в океане:

$$F(T) = CK_z(T) = \frac{A}{(B + RT)^\gamma}, \quad (4.7)$$

где  $A = S \mu h_E^\gamma N_E^\gamma$ ;  $B = \frac{h_E^2 N_E^2}{H + h_E} - \frac{g \rho_H \alpha_T}{\rho_0} T_H$ ;  $R = \frac{g \rho_H \alpha_T}{\rho_0}$ ,  $S$  – число Шмидта (отношение характерного значения кинематического коэффициента турбулентной теплопроводности к кинематическому коэффициенту турбулентного обмена импульсом).

Рассмотрим вначале случай термически однородного океана  $T(z) = T_0$ . Нижнюю границу поверхностного слоя Экмана (т.е. верхнюю границу геострофической области) отождествим с поверхностью океана. Соотношение (32) позволяет избежать сингулярности в

(4.7), поэтому будем иметь  $B+RT>0$ . Первообразной функцией для функции (4.7) при  $\gamma \neq 1$  будет функция  $A/(1-\gamma)R(B+RT)^{\gamma-1}$ , а при  $\gamma=1$  – функция  $(A/R)\ln(B+RT)$ . При  $\gamma=1$  получим для инварианта выражение:

$$\langle \ln(B+RT^{(\infty)}) \rangle = \langle \ln[B+R(T_0+T_1\cos\omega t)] \rangle. \quad (4.8)$$

Вычисляя интеграл в правой части (4.8), будем иметь

$$\ln(B+RT^{(\infty)}) = \ln \left\{ \frac{B+RT_0 + \sqrt{(B+RT_0)^2 - (RT_1)^2}}{2} \right\}. \quad (4.9)$$

При условии малости отношения  $RT_1/(B+RT_0)$  соотношение (4.9) упрощается:

$$T^{(\infty)} - T_0 = T^{(-)} \approx - \frac{RT_1^2}{4(B+RT_0)}. \quad (4.10)$$

Аналогично находим выражение для пампинг-эффекта при  $\gamma=1/2$ . В этом случае первообразной функцией для (4.7) будет функция  $\frac{2A}{R}\sqrt{B+RT}$ . Для пампинг-эффекта получим выражение

$$T^{(\mp)} = \frac{11}{R} \left[ \frac{6}{4\pi^2} (B+RT_0+RT_1) E^2(k) - (B+RT_0) \right], \quad (4.11)$$

где

$$k^2 = 2a/(1+a) < 1, \quad a = RT_1/(B+RT_0). \quad (4.12)$$

В (4.11)  $E(k)$  – полный эллиптический интеграл второго рода. Разлагая  $E(k)$  до вторых степеней и оставляя только члены до четвертого порядка по  $k$  получим

$$T^{(-)} \approx - \frac{RT_1^2}{8(B+RT_0+RT_1)}. \quad (4.13)$$

Итак, пампинг-эффект для Мирового океана отрицателен. Это означает, что когда амплитуда колебания поверхностной температуры  $T_1$  в океане увеличивается, температура глубинных слоёв падает, т.е. тепло начинает откачиваться из глубинных слоёв океана. И наоборот, при уменьшении амплитуды колебания поверхностной температуры по сравнению с предыдущим периодом времени глубинные слои будут теплеть, т.е. тепло будет закачиваться вглубь океана.

Приведём количественные оценки на примере Тихого океана. Полагаем, что  $h_E \approx 100$  м,  $N_E \approx 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ,  $H \approx 5$  км, и  $\alpha_T = 1,67 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$ . Для оценок используем среднее значение придонной температуры Тихого океана  $T_H \approx 2,08^\circ\text{C}$ . Тогда вычисления дают  $B \approx -3,27 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$  и

$R \approx 1,67 \times 10^{-3}$  м/(°C) $^{-1}$ с $^{-2}$  Средняя температура вод Тихого океана составляет  $T_0 \approx 3,66$  °C [3], в результате получим  $B + RT_0 \approx 2,8 \times 10^{-3}$  м/с $^2$ .

Из основной теоремы и полученных формул для пампинг-эффекта следует, что величина пампинг-эффекта не зависит от коэффициента  $A$  в (4.7). Но от него зависит толщина слоя Стокса, в котором решение выходит на асимптотику. Из (1.15) получим толщину слоя Стокса, в котором наблюдаются колебания температуры и в котором температура выходит на асимптотический уровень пампинг-эффекта  $T^\infty$ ,

$$L_{(+)}) = \left[ \frac{A}{2\omega(B+RT_0)^\gamma} \right]^{1/2}. \quad (4.14)$$

Принимая число Шмидта, равным единице ( $S \approx 1$ ), получим  $A \approx 2 \times 10^{-7}$  м $^3$ /с $^3$ . Вычисляя (4.14), получим толщину слоя Стокса около 83 м для колебаний температуры с периодом один год и около 187 м для колебаний температуры с периодом пять лет. Из приведённых оценок видно, что толщина слоя Стокса, где температура выходит на асимптотический уровень, существенно меньше общей глубины океана и поэтому приближение бесконечно глубокого океана для расчёта величины пампинг-эффекта вполне обосновано.

Оценим, насколько температура глубинных слоёв однородного океана может снизиться при увеличении амплитуды многолетних колебаний температуры поверхности океана на  $T_1 \approx 0,35$  °C. Рис. 1 иллюстрирует эту ситуацию. Для  $\gamma = 1$  соотношение (4.10) даёт оценку  $\Delta T_\infty^{(-)} = -1,9 \cdot 10^{-2}$  (°C). В случае  $\gamma = 1/2$  вычисления по формуле (4.11) приводят к оценке  $\Delta T_\infty^{(-)} = -9 \cdot 10^{-3}$  (°C).

Приведённые выше оценки потерь тепла глубинными слоями океана были сделаны для термически однородного океана. Такое состояние океана соответствует одному из стационарных решений уравнения (B. 1) с коэффициентом температуропроводности в форме (4.7) при нулевом фоновом потоке тепла по вертикали. Однако в реальном океане фоновый поток тепла по вертикали, вообще говоря, не равен нулю. Оценим величину пампинг-эффекта при наличии ненулевого фонового потока тепла. При  $\gamma = 1$  в (4.7) уравнения (B. 1) имеет стационарное решение

$$T(z) = \frac{1}{R} [-B + C_1 \exp(C_2 Rz)], \quad (4.15)$$

где

$$C_1 = RT_S + B, \quad C_2 = \frac{1}{RH} \ln \frac{RT_H + B}{RT_S + B}, \quad (4.16)$$

$T_S$  – температура поверхности океана и  $T_H$  – придонная температура,  $H$  – глубина океана.

Решение (4.15) описывает фоновое стационарное экспоненциальное распределение температуры в океане в геострофической области с поверхностной температурой  $T_S$  и придонной температурой  $T_H$ . На рис. 2 приведено численное решение одномерного уравнения (В. 1) с функцией температуропроводности (4.7) для  $\gamma=1$  при фоновом распределении температуры поглубине (4.15) с  $T_S=10^\circ\text{C}$  и  $T_H=2,08^\circ\text{C}$ . На поверхности океана ставилось граничное условие на температуру в виде  $T(t, z)|_{z=0}=10+0,7\sin\omega t$  с периодом  $2\pi/\omega=1$  год. Функция температуропроводности задавалась в виде (4.7) со значениями  $B=-3,27\times 10^{-3} \text{ м}/\text{с}^2$ ,  $R=1,67\times 10^{-3} \text{ м}/\text{с}^2$  ( $^\circ\text{C}$ ).

Так как величина пампинг-эффекта не зависит от значения коэффициента  $A$  (от него зависит только толщина слоя Стокса), то в расчётах принималось  $A=4\times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}^3$ . Амплитуда флюктуаций поверхностной температуры, равная 0,7, задавалась на основании работы [19]. Как видно из рис. 3, после начала счета температура во всех точ-

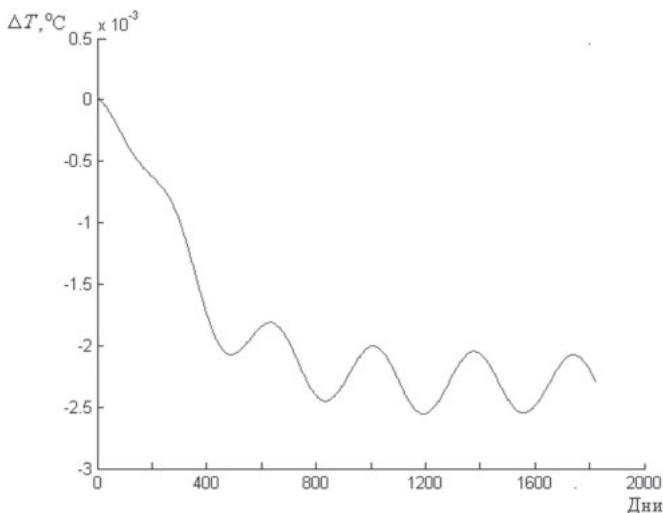


Рис. 2. Падение температуры на глубине 2000 м относительно стационарного решения (4.15) после включения годовых колебаний температуры поверхности океана с амплитудой  $0,7^\circ\text{C}$  (численный эксперимент)

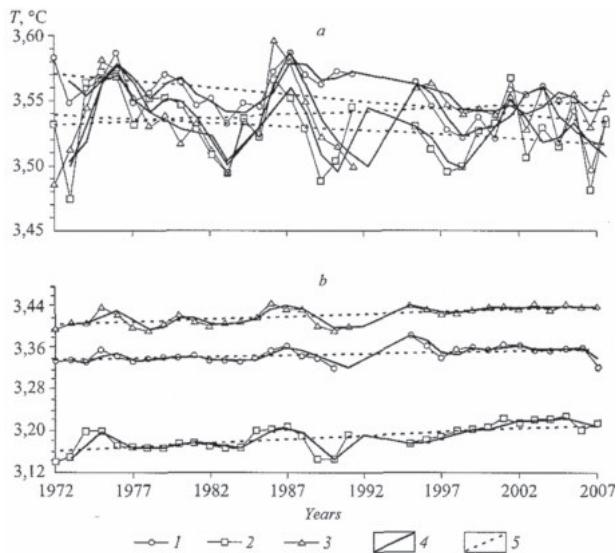


Рис. 3. Осреднённые долгопериодные изменения температуры слоёв воды в Южном, Среднем и Северном Байкале в июне–сентябре 1972–2007 гг. [32]: (а) – поверхностный слой 200–400 м, (б) – придонный слой (200 м от дна)  
 (1) Южный Байкал, (2) Средний Байкал, (3) Северный Байкал, (4) – скользящее осреднение по 5-ти годам, (5) – тренд

как водной толщи начинает падать. На глубине 2000 м она снижается на величину  $2,5 \times 10^{-3}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). Дополнительный поток тепла из глубинных слоев океана за счт пампинг-эффекта может составлять около 0,18–0,25 Вт/м<sup>2</sup>.

Интересный пример проявления нелинейной волновой диффузии тепла наблюдается на Байкале. На рис. 3 представлены долгопериодные колебания температуры, осредненные по поверхностному слою 200–400 м и по 200-метровому придонному слою [32]. Из рисунка видно, что средняя температура в поверхностном слое в летний период 1972–2007 гг. падает, т.е. поверхностные слои озера охлаждаются. В то время как температура придонных слоёв повышается! Очевидно, что это явление никак не может быть объяснено конвекцией, иначе бы нижние слои тоже охлаждались.

По-видимому, это явление связано с проявлением пампинг-эффекта. Действительно, если обратить внимание на амплитуды колебаний температуры поверхностного слоя, то можно увидеть, что амплитуды долгопериодных колебаний температуры в слое 200–400 м за период

1972–2007 гг. уменьшились почти вдвое. В соответствии с теорией пампинг-эффекта уменьшение амплитуды колебания температуры на границе области приводит к закачке тепла в глубинные слои и, следовательно, к их потеплению. Вероятно, этим и можно объяснить столь странное поведение температуры придонных слоёв озера Байкал.

## 5. Пампинг-эффект в динамике грунтовых вод: теория, эксперимент

### 5.1. Теория

Пампинг-эффект проявляется в динамике грунтовых вод, в частности, при фильтрации морских вод в береговые водоносные слои в приливных морях, что приводит к увеличению дальности проникновению морских вод в водоносные горизонты и повышению уровня грунтовых вод.

Рассмотрим задачу безнапорной фильтрации грунтовых вод. В приближении Буссинеска будем иметь одномерное нелинейное параболическое уравнение относительно уровня грунтовых вод  $H(z, t)$ :

$$m \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{\eta^n} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \eta^n k H \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) + \epsilon(H, \eta, t), \quad (5.1.1)$$

где  $m$  – пористость (недостаток насыщения),  $t$  – время,  $k$  – коэффициент фильтрации,  $\epsilon(H, \eta, t)$  – источники и стоки (перетекание в нижние пласти, инфильтрация или испарение с поверхности грунтовых вод). При  $n=1$  уравнение (5.1.1) соответствует осесимметричному случаю в полярных координатах ( $\eta=r$ ), при  $n=0$  – одномерному случаю в декартовой системе координат ( $\eta=x$ ), когда фильтрация рассматривается в вертикальной плоскости.

Будем рассматривать динамику грунтовых вод в декартовой системе координат, тогда  $H(x, t)$  будет описываться уравнением (5.1.1) с  $n=0$ . При отсутствии перетекания в нижние пласти, а также инфильтрации и испарения  $\epsilon(H, \eta, t)=0$ . Если уровень воды в водоёме на входе в водоносный пласт имеет периодическое изменение во времени, тогда  $H(x, t)$  описывается уравнением (B. 1) на полупрямой  $x>0$  с периодическим граничным условием при  $x=0$ :

$$H(0, t) = H_0 + H_1 \cos(\omega t), \quad (5.1.2)$$

где  $H_1$  – амплитуда колебания уровня грунтовых вод при  $x=0$ ,  $\omega$  – частота колебаний,  $H_0$  – среднее значение уровня грунтовых вод.

Найдём величину пампинг-эффекта. Для этого вычислим инвариант  $\langle F(H(x, t)) \rangle$ , значения которого должны быть одинаковыми на границе  $x=0$  и на бесконечности  $x=+\infty$ , где колебания затухают. Первообразной для функции  $K(H)=H$  будет функция  $F(H)=\frac{1}{2}H^2$ . На бесконечности имеем

$$\langle F(H(\infty)) \rangle = \frac{1}{2}(H_0 + H^{(+)})^2. \quad (5.1.3)$$

Величина  $H^{(+)}$  и будет значением пампинг-эффекта. Значение инварианта при  $x=0$  с учётом (5.1.2) равно

$$\langle F(H(0, t)) \rangle = \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi/\omega} (H_0 + H_1 \cos \omega t)^2 dt = \frac{1}{2} \left( H_0^2 + \frac{H_1^2}{2} \right). \quad (5.1.4)$$

Приравнивая (5.1.3) и (5.1.4), получим

$$H^{(+)} = \left( H_0^2 + \frac{H_1^2}{2} \right)^{1/2} - H_0. \quad (5.1.5)$$

Из (5.1.5) видно, что величина пампинг-эффекта в задаче о беззапорной фильтрации всегда положительная. Если амплитуда колебаний  $H_1$  в (5.1.2) мала по сравнению с  $H_0$ , то выражение (5.1.5) можно упростить

$$H^{(+)} \approx \frac{H_1^2}{4H_0}. \quad (5.1.6)$$

Итак, периодические колебания уровня грунтовых вод на входе в водоносный пласт около своего среднего положения  $H_0$  приводят за счёт пампинг-эффекта к стационарному повышению уровня грунтовых вод на бесконечности на величину  $H^{(+)}$ . Формула (5.1.6) была получена также в [30].

Если длина водоносного пласта имеет конечную протяжённость  $L$ , то, используя решение (1.13), получим величину пампинг-эффекта на конце пласта при условии  $H_1 \ll H_0$ :

$$H^{(+)}(L) \approx -\frac{H_1^2}{4H_0} \left[ \frac{1}{\cosh(\lambda L) \cosh(\lambda^* L)} - 1 \right], \text{ где } \lambda = (1+i) \sqrt{\frac{\omega m}{2H_0 k}}. \quad (5.1.7)$$

Для наклонного берега имеем выражение для осреднённого за период прилива профиля вдоль пласта, полученное в работе [21]:

$$\langle H(x) \rangle = \frac{H_1^2}{H_0} \left[ \frac{1}{4} (1 - e^{-2kx}) + \frac{\beta}{2} (1 - \sqrt{2} e^{-kx} \sin(x + \frac{\pi}{4})) \right], \quad (5.1.8)$$

где  $k = \sqrt{\frac{\omega m}{2H_0 k_f}}$ ,  $\beta = H_0 k \operatorname{ctg}(\alpha)$ ,  $\alpha$  – угол наклона берега.

Из (5.1.8) видно, что величина пампинг-эффекта в глубине пласта в случае наклонного берега будет равна [ 21]:

$$H^{(+)}/H_0 = \frac{H_1^2}{H_0} \left[ \frac{1}{4} + \frac{\beta}{2} \right], \quad (5.1.9)$$

т.е. наклонный берег даёт дополнительную добавку в пампинг-эффект. Эта добавка к базовому пампинг-эффекту названа в [ 21] профильным пампинг-эффектом.

## 5.2. Пампинг-эффект в тонких насыщенных слоях с приточностью

При наличии насыщенного слоя движения грунтовых вод с верхней или нижней приточностью, так же как течения в перфорированных трубах с боковым притоком или оттоком, описываются уравнением Бюргерса относительно скорости [20]. И если на боковой границе слоя будут колебания скорости, например из-за прилива, то возникающий пампинг-эффект приведёт к интересному математическому результату – возникновению постоянного потока вглубь слоя от его внешней границы [20]. Здесь нелинейность входит не через диффузию, а через адвекцию. Покажем, что для этого уравнения также имеет место пампинг-эффект. Рассмотрим периодическую задачу для уравнения Бюргерса на полупрямой

$$\tau_t + (\tau_x)^2 = n\tau_{xx} \quad (5.2.1)$$

с граничными условиями

$$\zeta|_{x=0} = \zeta^{(0)} \sin \omega t, \quad \zeta|_{x \rightarrow \infty} < C < \infty. \quad (5.2.2)$$

Уравнение (5.2.1) написано в безразмерном виде,  $n$  – безразмерный коэффициент вязкости. Заменой Хопфа – Коула  $\tau = 2n \ln(\eta)$  уравнение (5.2.1) сводится к линейному уравнению теплопроводности относительно новой функции  $\eta$ , решение которого с граничными условиями (5.2.2) будет иметь вид

$$\phi(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \exp \left\{ -\xi^2 - \frac{\zeta^{(0)}}{2v} \sin \left[ \omega \left( t - \frac{x^2}{4v\xi} \right) \right] \right\} d\xi. \quad (5.2.3)$$

Чтобы вычислить интеграл (5.2.3), воспользуемся производящей функцией для функций Бесселя первого рода. Тогда можно написать

$$\phi(x, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{2\exp(in\omega t)}{\sqrt{\pi}} J_n\left(-\frac{\zeta^{(0)}}{2vi}\right) \int_0^{\infty} \exp\left[-x^2 - \frac{in\omega x^2}{4vx^2}\right] d\xi. \quad (5.2.4)$$

Чтобы найти предел функции  $\phi(x, t)$  в (5.2.4) при  $x \rightarrow +\infty$ , воспользуемся леммой Римана–Лебега об интегралах от осциллирующих функций [18]. В результате получим

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \phi(x, t) = \frac{2}{\pi} J_0\left(-\frac{\zeta^{(0)}}{2vi}\right) \int_0^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi = J_0\left(-\frac{\zeta^{(0)}}{2vi}\right) = I_0\left(\frac{\zeta^{(0)}}{2v}\right), \quad (5.2.5)$$

где  $I_0$  – функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента. Возвращаясь к исходной функции  $\zeta(x, t)$ , получим выражение для пампинг-эффекта для уравнения Бюргерса (5.2.1):

$$\zeta^{(+)} = 2v \ln \left[ I_0\left(\frac{\zeta^{(0)}}{2v}\right) \right]. \quad (5.2.6)$$

Так как  $I_0 \geq 1$ , то пампинг-эффект для уравнения Бюргерса всегда положителен. При условии малости аргумента функции  $I_0$  выражение (5.2.6) упрощается:

$$\zeta^{(+)} \approx \frac{(\zeta^{(0)})^2}{16v}. \quad (5.2.7)$$

Из (5.2.7) видно, что значение пампинг-эффекта для уравнения Бюргерса зависит обратно пропорционально от вязкости.

### 5.3. Эксперимент

Большой интерес представляет экспериментальное подтверждение пампинг-эффекта. С этой целью были проведены лабораторные эксперименты для проверки пампинг-эффекта в задачах фильтрации грунтовых вод под действием волн и количественного сравнения с выводами теории (5.1.6) и (5.1.9) [10].

Лабораторная установка состояла из прямоугольной кюветы из плексигласа длиной 60, шириной 12 и высотой 15 см. Схема лабораторной установки приведена на рис. 4. В качестве экспериментального материала, имитирующего грунт, использовались полиэтиленовые гранулы диаметром ~3,7 мм. Такой размер гранул брался с целью снижения до минимума влияния на процесс капилярности. Гранулы насыпались в правую часть кюветы высотой 6 см. Передняя граница насыпи удерживалась латунной сеткой. Проводилось два вида экспериментов – с вертикальным береговым откосом и с береговым уклоном 30°. Высота воды составляла  $H_0 = 3$  см.

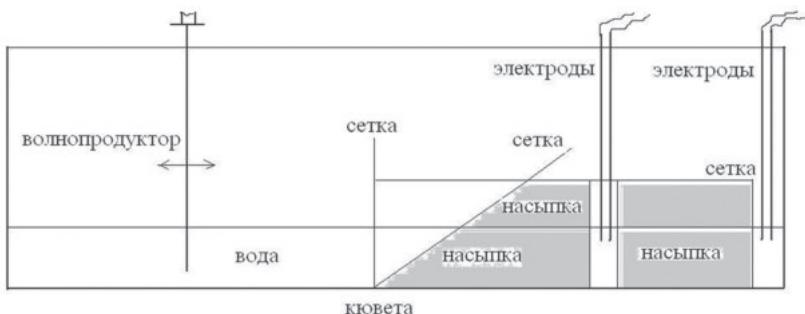


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Пористость материала определялась экспериментально заливкой воды. Взвешивался контрольный объём сухой засыпки, затем по верхнюю границу засыпки наливалась вода, и контрольный объём вновь взвешивался. Затем засыпка высушивалась и опыт повторялся с целью набора статистики. Всего было проведено пять измерений. Зная удельный вес полиэтилена и воды, вычислялись их объёмы, и находилась пористость.

#### Выборка измерений по определению пористости лабораторного материала

Измерение	1	2	3	4	5
Масса сухого материала $M_1$ , гр.	38	39	39	37	38
Масса заполненного водой материала $M_2$ , гр.	55	55	56	57	55
Пористость ( $m$ )	0,277	0,261	0,273	0,317	0,277

Как видно из таблицы, среднее значение пористости лабораторного материала составляло 0,28. Оценку коэффициента проницаемости  $k$  проводили двумя способами: по теории идеальных грунтов Козени–Кармана [10], откуда получили для коэффициента фильтрации оценку:  $k_f \approx 290$  см/с, и обратной задачей, по экспериментальным данным через декремент затухания волны в грунте. По данным эксперимента, амплитуда волны при прохождении через насыпку в кювете длиной в 29 см уменьшается с 5 мм на входе до 0,17 мм в конце кюветы. Зная экспоненциальный закон затухания волны для вертикального берега, вычислили  $k_f$ . Было получено  $k_f \approx 96$  см/с, т.е. в три раза меньше, нежели по теории идеальных грунтов. Из-за того, что в носике насыпки не удалось выдержать по техническим причинам угол в  $30^\circ$  из-за загиба проволочной арматуры

каркаса сетки, эффективный угол наклона берега в зоне наката волны составил  $\sim 45^\circ$ . Соответственно, для в было принято в расчётах значение  $\beta \approx 0,3$ .

Набегающая на берег волна генерировалась в левой половине кюветы лопаточным волнопродуктором (рис. 4). Вертикальная лопатка волнопродуктора осуществляла синусоидальное возвратно-поступательное движение вдоль оси канала с периодом 1,1 с. Такой период движения лопатки задавался с целью возбуждения первой моды сейшевых колебаний в левой части кюветы. Это необходимо было для того, чтобы накат воды на насыпь имел одну чётко выраженную единичную гармонику без наложения волн других периодов.

Регистрация уровня воды в грунте производилась в самом конце кюветы, где был оставлен отгороженный сеткой свободный от насыпного материала промежуток до стенки в 1 см. Кроме того, в середине насыпки на расстоянии 18 см от её передней кромки также была сделана вертикальная круглая полость диаметром 1 см с сеточным ограждением для регистрации уровня в промежуточной точке насыпки. Регистрирующая аппаратура состояла из двух проволочных параллельных электродов, которые нижними концами опускались в воду. На контакты подавалось переменное напряжение через мост, с которого снимался аналоговый сигнал. Чувствительность системы менялась с помощью компенсатора напряжения. Точность измерения составляла 0,01 мм. Аналоговый сигнал (напряжение тока) подавался на микропроцессор Arduino Uno, скоторогооцифрованный массив колебания напряжения поступал в компьютер. Связь между изменениями напряжения тока и уровня воды для метрической оцифровки значений устанавливалась с помощью винтового микрометра.

На рис. 5 в качестве примера приведена запись колебания уровня в конце кюветы после прохождения волн через насыпку для вертикального берегового откоса. Из рисунка видно, что после возбуждения волнопродуктором волны средний уровень колебаний в конце кюветы поднимается. Это и есть пампинг-эффект. Аналогичные записи были получены для наклонного берега, в том числе и в средней точке насыпки.

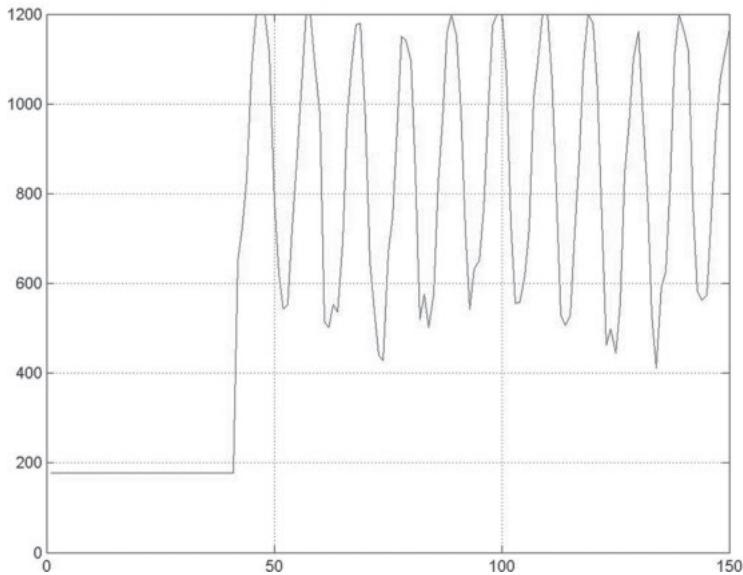


Рис. 5. Запись оцифрованного сигнала колебания уровня воды в эксперименте с отвесным берегом.

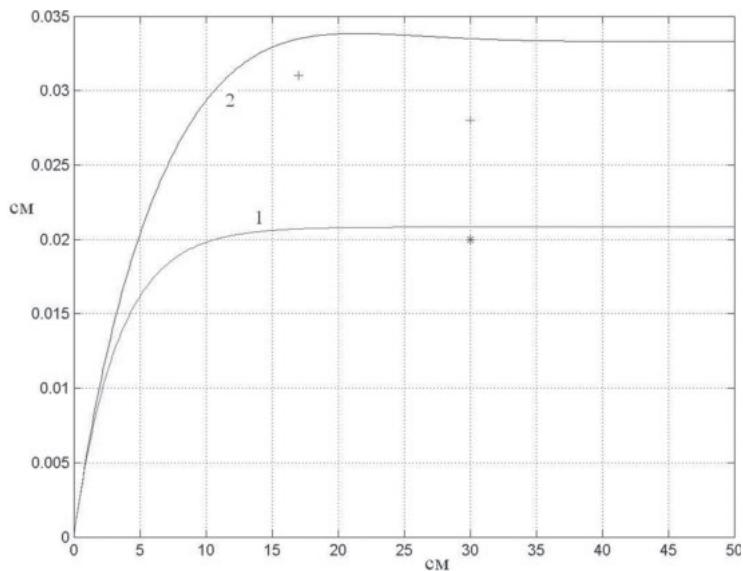


Рис. 6. Распределение среднего уровня по (13) и данные экспериментов: 1 – для отвесного берега (эксперимент – звёздочка); 2 – для наклонного берега (эксперимент – крестики).

На рис. 6 приведены графики осреднённого за период уровня воды, построенные по зависимости (5.1.9) для наклонного под углом  $45^\circ$  берега и для отвесного берега ( $\beta=0$ ) по (5.1.6). Звездочками нанесены экспериментальные точки. Как видно из рисунка, эксперимент подтверждает теоретические результаты. Для отвесного берега экспериментальная точка довольно близко лежит от теоретической кривой, для наклонного берега соответствие несколько хуже. Это, по-видимому, связано с неточностью определения коэффициента фильтрации и угла наклона берега в зоне наката волн. Но качественно эксперимент подтвердил ещё один важный теоретический результат – существование локального максимума на кривой 2 для среднего уровня для наклонного берега [20], который отсутствует в случае отвесного берега [9].

### 6. Пампинг-эффект в задаче Стефана о росте льда

Рассмотрим задачу теплопроводности для льда, которая является основополагающей в теории Стефана о росте льда. Коэффициент температуропроводности  $F(T)$  для пресноводного льда является дробно-линейной функцией от температуры льда [10]:

$$F(T)=k(T)/[C_p(T)c_{ice}], \quad (6.1)$$

где

$$k(T)=5,35\times 10^{-3}(1-4,8\times 10^{-3}T) \text{ кал}/(\text{°C см с}),$$

$$C_p(T)=(0,5057+0,0018664T) \text{ кал}/(\text{г °C}). \quad (6.2)$$

До членов второго порядка можно записать

$$F(T)=C_1+C_2T+C_3T^2, \quad (6.3)$$

где  $C_1=1,0578\times 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $C_2=-8,9922\times 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с} \cdot \text{°C}$ ,  $C_3=1,8788\times 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с} \cdot (\text{°C})^2$ .

С учётом (6.1) – (6.3) имеем уравнение теплопроводности для льда

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[(C_1+C_2T+C_3T^2)\frac{\partial T}{\partial z}\right]. \quad (6.4)$$

В дальнейшем членом  $C_3T^2$  в (6.4) будем пренебрегать ввиду его малости по сравнению с двумя предыдущими.

Найдём стационарный фоновый поток тепла через лёд при условии, что температура на поверхности льда постоянная или очень медленно меняющаяся. Из (6.4) будем иметь уравнение

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[(C_1+C_2T)\frac{\partial T}{\partial z}\right]=0, \quad (6.5)$$

с граничными условиями:

$$T|_{z=0} = T_0, \quad T|_{z=h} = 0, \quad (6.6)$$

где  $h$  – нижняя граница льда.

Интегрируя (6.5) по  $z$ , получим

$$(C_1 + C_2 T) dT = \tilde{C}_1 dz. \quad (6.7)$$

Интегрируя ещё раз левую и правую части (6.7), будем иметь

$$C_1 T + \frac{1}{2} C_2 T^2 = \tilde{C}_1 z + \tilde{C}_2, \quad (6.8)$$

где  $\tilde{C}_1$  и  $\tilde{C}_2$  – константы интегрирования.

Подставляя (6.8) в граничные условия (6.6), получим

$$\tilde{C}_2 = C_1 T_0 + \frac{1}{2} C_2 T_0^2, \quad \tilde{C}_1 = -\tilde{C}_2/h. \quad (6.9)$$

Откуда получим для потока тепла через выражение:

$$G_{ice}^{(T)} = \rho_{ice} C_p(T) (C_1 + C_2 T) \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\rho_{ice} C_p(T)}{h} \left( C_1 T_0 + \frac{1}{2} C_2 T_0^2 \right). \quad (6.10)$$

Первообразная функция от  $F(T)$  в (6.5) будет

$$\Psi(T) = C_1 T + \frac{C_2}{2} T^2. \quad (6.11)$$

Таким образом, для определения значения температуры  $T^{(\infty)}$  при вычислении инварианта получим из (6.11) квадратное уравнение. Если учитывать член  $C_3 T^2$  в (6.4), то для  $T^{(\infty)}$  будем иметь кубическое уравнение.

Перейдём к вычислению пампинг-эффекта. Для этих целей приведем уравнение (6.4) к безразмерному виду, введя безразмерные переменные со штрихом

$$T = \tilde{T} T', \quad t = \tau t', \quad z = Hz'. \quad (6.12)$$

Подставляя (6.12) в (6.4), будем иметь

$$\frac{\partial T'}{\partial t'} = \frac{\partial}{\partial z'} \left[ \left( \frac{\tau}{H^2} C_1 + \frac{\tau \tilde{T}}{H^2} C_2 T' + \frac{\tau \tilde{T}^2}{H^2} C_3 (T')^2 \right) \frac{\partial T'}{\partial z'} \right]. \quad (6.13)$$

Зададим характерные масштабы величин в (6.12):  $\tau = 4$  часа (масштаб срочных измерений температуры воздуха),  $\tilde{T} = 1^\circ\text{C}$ ,  $H = 10$  см, тогда будем иметь характерные значения безразмерных констант: (6.13)

$$\frac{\tau}{H^2} C_1 \approx 1,52, \quad \frac{\tau \tilde{T}}{H^2} C_2 \approx -1,29 \cdot 10^{-2}, \quad \frac{\tau \tilde{T}^2}{H^2} C_3 \approx 2,7 \cdot 10^{-5}. \quad (6.14)$$

Из (6.14) видно, что в уравнении (6.13) действительно достаточно оставить только два первых слагаемых. В результате будем иметь безразмерную форму уравнения (6.4) (штрихи далее опускаем):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\alpha + \epsilon \beta T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad (6.15)$$

где  $\alpha = \tau C_1 / H^2 \sim O(1)$ ,  $\beta = (\tilde{T} C_2 / H^2) \times 10^2 \sim O(1)$ ,  $\epsilon = 0,01$ .

Границные условия:

на поверхности льда:

$$T|_{z=0} = T_0 + T_1 \cos(\omega t), \quad (6.16)$$

на границе вода–лёд  $z=l=h/H$ :

$$T|_{z=l} = 0, \quad (6.17)$$

где  $T_0 = T_0^{(a)} / \tilde{T}$ ,  $T_1 = T_1^{(a)} / \tilde{T}$ ,  $\omega = \omega^{(a)} \tau$ ,  $T_0^{(a)}$  и  $T_1^{(a)}$  – среднее значение амплитуда колебания температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\omega^{(a)}$  – частота колебаний температуры воздуха (1/ч).

Решение (6.15) – (6.17) ищем в виде асимптотического ряда по малому параметру  $\epsilon$ :

$$T = T^{(0)} + \epsilon T^{(1)} + \epsilon^2 T^{(2)} + \dots . \quad (6.18)$$

Ограничимся в (6.18) членами первого порядка по  $\epsilon$ . Подставляя (6.18) в (6.15) и отбрасывая слагаемые, начиная с  $\epsilon^2$ , получим уравнение для нулевой степени  $\epsilon^0$ :

$$\frac{\partial T^{(0)}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T^{(0)}}{\partial z^2}. \quad (6.19)$$

с граничными условиями:

на поверхности льда:

$$T^{(0)}|_{z=0} = T_0 + T_1 \cos(\omega t), \quad (6.20)$$

на границе вода–лёд  $z=l$ :

$$T^{(0)}|_{z=l} = 0, \quad (6.21)$$

В соответствии с граничными условиями (6.20) ищем решение в виде суммы стационарной и волновой частей. В результате получим:

$$T^{(0)} = T_0 \left( 1 - \frac{z}{l} \right) + \frac{T_1}{2} \left[ Q(z) e^{-i\omega t} + Q^*(z) e^{i\omega t} \right], \quad (6.22)$$

где

$$Q(z) = \frac{\sinh[\gamma(l-z)]}{\sinh(\gamma l)}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha}}. \quad (6.23)$$

Звёздочка в (6.22) означает комплексно-сопряжённое выражение.

Для членов порядка  $\epsilon$  имеем уравнение:

$$\frac{\partial T^{(1)}}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\beta}{2} \frac{\partial^2 (T^{(0)})^2}{\partial z^2} \quad (6.24)$$

с нулевыми граничными условиями:

на поверхности льда:

$$T^{(1)}|_{z=0} = 0, \quad (6.25)$$

на границе вода–лёд  $z=l$ :

$$T^{(1)}|_{z=l} = 0, \quad (6.26)$$

Вычислим  $(T^{(0)})^2$  в (6.24), получим

$$\begin{aligned} (T^{(0)})^2 = & T_0^2 \left(1 - \frac{z}{l}\right)^2 + \frac{T_1^2}{2} Q(z) Q^*(z) + \frac{T_1^2}{2} (Q^2(z) e^{-2i\omega t} + (Q^*(z))^2 e^{2i\omega t}) + \\ & + T^{(0)} T^{(1)} \left(1 - \frac{z}{l}\right) [Q(z) e^{-i\omega t} + Q^*(z) e^{i\omega t}]. \end{aligned} \quad (6.27)$$

Из (6.27) следует, что функция источника в (6.24) содержит стационарную часть и волновые части с частотами  $\omega$  и  $2\omega$ . Как следует из (1.15), толщина льда, на которую проникают волновые возмущения от поверхности, равна

$$L_{(+)} = \left( \frac{C_1}{2\omega} \right)^{1/2}. \quad (6.28)$$

Подставляя в (6.28) значение  $C_1$  из (6.3), получим для суточных колебаний температуры на поверхности льда  $L_{(+)} \sim 8,5$  см, а для синоптических колебаний 7 суток –  $L_{(+)} \sim 23$  см. Ограничивааясь периодами колебаниями температуры воздуха не более синоптического масштаба, будем рассматривать толщины льда более 25 см. Тогда на нижней границе льда температурные волны, возбуждаемые функцией источника (6.27), будут затухать и тепловой поток будет определяться только стационарной частью выражения (6.27). В результате для стационарной части  $T^{(1)}$  в (6.24) будем иметь уравнение:

$$\alpha \frac{\partial^2 T^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\beta}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[ T_0^2 \left(1 - \frac{z}{l}\right)^2 + \frac{T_1^2}{2} Q(z) Q^*(z) \right] = 0. \quad (6.29)$$

с нулевыми граничными условиями (6.25), (6.26). Решая уравнение (6.29) с учетом (6.25) и (6.26), получим выражение для стационарной части  $T^{(1)}$ :

$$\begin{aligned} T^{(1)} = & -\frac{\beta}{2\alpha} \left\{ T_0^2 \left(1 - \frac{z}{l}\right)^2 - T_0^2 + \frac{T_1^2}{2} (Q(z) Q^*(z) - Q(0) Q^*(0)) - \right. \\ & \left. - \frac{z}{l} \left[ \frac{T_1^2}{2} Q(l) Q^*(l) - T_0^2 - \frac{T_1^2}{2} Q(0) Q^*(0) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.30)$$

Таким образом, поток тепла (безразмерный) на нижней границе льда с точностью до  $O(\epsilon^2)$  будет равен

$$G = -\frac{1}{l} \left[ \alpha T_0 + \frac{\epsilon \beta}{2} \left( T_0^2 + \frac{T_1^2}{2} \right) \right], \quad (6.31)$$

или в размерных переменных

$$G_{ice}^{(T)} = -\frac{\rho_{ice} C_p(T)}{h} \left[ C_1 T_0 + \frac{C_2}{2} \left( T_0^2 + \frac{T_1^2}{2} \right) \right]. \quad (6.32)$$

Сравнивая (6.32) с (6.10), получим, что добавка в поток тепла через лёд за счёт пампинг-эффекта составляет

$$G_{ice}^{(+)} = -\frac{\rho_{ice} C_p(T) C_2 T_1^2}{4h}. \quad (6.33)$$

Учитывая, что линейная поправка в формуле для  $C_p(T)$  мала, пренебрежем зависимостью  $C_p(T)$  от  $T$ , т.е. положим  $C_p(T) \approx \text{const} = 0,5057$  кал/(°C). Тогда условие Стефана для скорости изменения нижней границы льда будет иметь вид

$$\rho_{ice} L_{ice} \frac{dh}{dt} = -\frac{\rho_{ice} \tilde{C}_p}{h} \left[ C_1 T_0 + \frac{C_2}{2} \left( T_0^2 + \frac{T_1^2}{2} \right) \right]. \quad (6.34)$$

Интегрируя (6.34) и учитывая, что  $T_0 = \frac{1}{t} \int_0^t T dt$ , получим основную формулу для роста льда, обобщающую формулу Стефана,

$$h^2 = -\frac{2\tilde{C}_p}{L_{ice}} \left[ C_1 \int_0^t T dt + \frac{C_2}{2} \left( \frac{1}{t} \left( \int_0^t T dt \right)^2 + \frac{t T_1^2}{2} \right) \right]. \quad (6.35)$$

Первое слагаемое в (6.35) – т.н. градусодни, которые входят в формулу Стефана [34]. Видно, что в добавление к формуле Стефана в (6.35) появляются ещё два слагаемых, обусловленных нелинейностью уравнения теплопроводности для льда (6.1), (6.2) и наличием волновой составляющей в граничном условии (6.20). Последнее слагаемое в (6.35) является пампинг-эффектом, возникающим из-за колебания температуры воздуха. Таким образом, с учётом нелинейности и пампинг-эффекта скорость нарастания льда будет больше, нежели по формуле Стефана.

Проанализируем формулу (6.35) применительно к экспериментальным данным. В работах [1, 22] описаны результаты

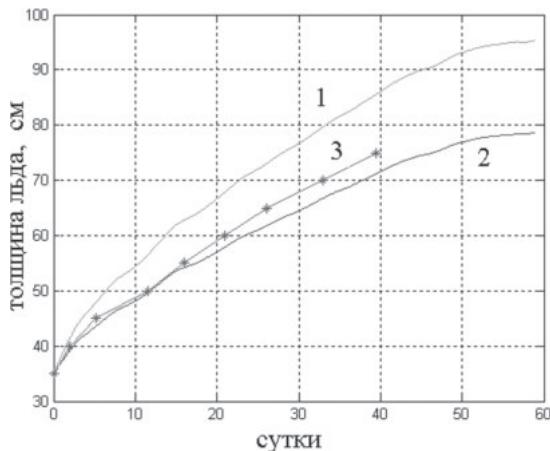


Рис. 7. Расчётные графики нарастания льда с использованием данных работы [1]: 1 – расчёт по формуле Стефана (1), 2 – по формуле Стефана с учётом поправки на поток тепла из воды в лёд на нижней границе льда [1], 3 – реальная толщина льда

эксперимента, проведённого в зимний период на Байкале. Авторы измерили с помощью гирлянды термисторов потоки тепла в ледяном покрове и в прилегающем снизу слое воды. В результате появилась возможность оценить поток тепла снизу из воды в лед. Простой расчет нарастания льда на Байкале по формуле Стефана по значениям температуры на поверхности льда через градусодни дал сильно завышенные результаты (рис. 7, кривая 1).

Одна из главных причин этого – неучёт в формуле Стефана потоков тепла снизу из воды в лёд. По данным работы [1] этот поток является существенным и составляет от 18 до 65% от общего потока тепла через лед в разные периоды времени. Если ввести в формулу корректировку на эту среднюю величину потока тепла из воды в лёд за период наблюдения, то получаются уже заниженные результаты (рис. 7, кривая 2). Последнее указывает на то, что должен быть ещё дополнительный неучтённый отток тепла из зоны кристаллизации льда, который должен ускорять нарастание льда. Такой поток действительно есть и он описывается дополнительными слагаемыми в (6.35), обусловленными эффектами нелинейности и пампинг-эффекта. Оценки показали, что добавка за счёт нелинейности и пампинг-эффекта в (6.35) для условий эксперимента на Байкале [1] ( $T_0 \approx 10^\circ\text{C}$  и  $T_1 \approx 4^\circ\text{C}$ ) может составлять от 9% до 14% от

слагаемого Стефана в (6.35). Это как раз та величина, которая убирает разницу между теоретической кривой 2 и экспериментальными данными (график 3) на рис. 7.

Из (6.33) видно, что пампинг-эффект для колебательных процессов во льду (включая ледники, многолетнюю мерзлоту) является отрицательным. Это означает, что тепло будет откачиваться из нижних слоёв ледового массива при увеличении амплитуды колебания температуры на его верхней границе. В зоне многолетней мерзлоты этот эффект может достигать существенных значений. К примеру, амплитуда внутригодовых колебаний температуры воздуха в Якутии достигает  $T_1=40^{\circ}\text{C}$  и тогда понижение температуры во внутренней области мерзлоты составит существенную величину  $T^{(-)}=-1,9^{\circ}\text{C}$ .

### Выводы

Как следует из данной работы, природные процессы, описываемые нелинейными параболическими уравнениями типа нелинейного уравнения теплопроводности с коэффициентом теплопроводности, являющимся функцией от искомой характеристики среды, довольно разнообразны. При наличии колебаний в такой системе, а они в природных процессах всегда есть, начинает проявляться пампинг-эффект.

Пампинг-эффект в динамике приливных волн на мелководье приводит к повышению среднего уровня воды на побережье. В устьях рек этот эффект даёт увеличение зоны подпора уровня воды в реке.

Морские воды проникают в устья рек в виде придонного клина соленых вод. В устьях рек, впадающих в приливные моря, пампинг-эффект может приводить к более глубокому проникновению солёных вод в устья рек по сравнению с тем, если бы этого прилива не было. Численные расчёты показали, что это увеличение дальности проникновения соленостного клина может достигать по сравнению с бесприливным морем нескольких километров.

Аналогичный эффект проявляется в процессе интрузии морских вод в подземные горизонты в приливных морях. Пампинг-эффект работает, как насос, осуществляющий накачку воды в слой.

Приложение пампинг-эффекта к теплосодержанию глубинных вод морей, океанов и глубоководных озёр показывает, что вариации

амплитуды колебания поверхностной температуры (ТПО) приводят либо к закачке тепла в глубинные слои, либо, наоборот, к откачке тепла из глубинных слоёв в зависимости от того, уменьшается или увеличивается амплитуда вариаций ТПО. Оценки показывают, что пампинг-эффект играет роль важного нелинейного механизма перераспределения потоков тепла на Земле. Дополнительный поток тепла из глубинных слоёв океана за счёт пампинг-эффекта может составлять около  $0,18\text{--}0,25 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Пампинг-эффект влияет и на распределение температуры во льдах, ледниках, многолетней мерзлоте. Коэффициент теплопроводности пресного льда является линейной убывающей функцией от температуры. Пампинг-эффект для льда отрицателен, поэтому температура внутри ледового массива должна быть меньше среднего значения на поверхности льда. В зоне многолетней мерзлоты этот эффект может достигать существенных значений. К примеру, среднегодовая температура воздуха в Якутске в Сибири составляет минус  $8,9\text{--}9,3^\circ\text{C}$ . Такая же должна быть температура мёрзлых грунтов на глубине, где годовые колебания температуры исчезают. Как известно, на глубинах 10 м температура мёрзлых грунтов ниже и составляет минус  $10\text{--}15^\circ\text{C}$ . По формуле (6.30) получим понижение температуры в данном регионе на глубине 10 м на минус  $1,9^\circ\text{C}$  от среднего значения минус  $8,9\text{--}9,3^\circ\text{C}$ , что составит величину порядка минус  $11^\circ\text{C}$ . Если учесть зависимость теплоёмкости льда  $C_p$  от температуры, то понижение температуры мёрзлых грунтов за счёт пампинг-эффекта может достигнуть ещё больших величин – до минус  $3\text{--}4^\circ\text{C}$ .

Учёт нелинейности уравнения теплопроводности для льда и колебаний температуры воздуха приводит к новому закону роста льда, обобщающему известную формулу Стефана. Помимо слагаемого с градусоднями в классической формуле Стефана новая формула содержит еще два дополнительных слагаемых, обусловленных нелинейностью уравнения теплопроводности для льда и пампинг-эффектом. Возникновение пампинг-эффекта указывает, что расчёт нарастания льда по осреднённым значениям температуры воздуха не совсем корректен.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Асламов И.А., Козлов В.В., Мизандронцев И.Б., Кучер К.М., Гринин Н.Г. Оценка потока тепла на границе вода–лёд на Байкале по

- экспериментальным данным // Доклады АН. Т. 457, №4, 2014. С. 477–480.
2. Баренблatt Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 254 с.
  3. Галеркин Л.И., Бараш М.Б., Сапожников В.В., Пастернак Ф.А. Тихий океан. М.: Мысль, 1982. 318 с.
  4. Дийкстра Х. Нелинейная физическая океанография. М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2007. 680 с.
  5. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
  6. Зырянов В.Н. Гидродинамика солёностного клина // Водные ресурсы. №6. 1987. С. 107–125.
  7. Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М.: ИВП РАН, 1995. 240 с.
  8. Зырянов В.Н. Антипотепление глубинных вод Мирового океана // Океанология. Т. 47, №5, 2007. С. 666–673.
  9. Зырянов В.Н. Нелинейный пампинг-эффект в колебательных процессах в геофизике // Водные ресурсы. Т. 40, №3, 2013. С. 227–239.
  10. Зырянов В.Н., Жмур В.В., Фомин Ю.В. Нелинейная волновая интрузия вод в береговые подземные горизонты: теория, эксперимент // Труды Конференции «Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения», Сочи, 2 – 7 октября 2017 г.
  11. Зырянов В.Н., Круглихин С.А. Нелинейный пампинг-эффект в задаче Стефана о нарастании льда // Процессы в геосредах. №4, 2016. С. 318–327.
  12. Зырянов В.Н., Музылев С.В. Нелинейная накачка уровня приливами на мелководье // ДАН СССР. Т. 298, №2, 1988. С. 454–458.
  13. Зырянов В.Н., Хубларян М.Г. Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложение в геофизике // ДАН. Т. 408, № 4, 2006. С. 535–538.
  14. Зырянов В.Н., Фролов А.П., Хубларян М.Г. Некоторые нелинейные режимы фильтрации грунтовых вод // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. №5, 2009. С.109–119.
  15. Зырянов В.Н., Чебанова М.К., Филатов Н.Н. Интрузия морских вод к устьям рек // Водные ресурсы. Т. 42, №5, 2015. С. 492–503.
  16. Лейбензон Л.С. Подземная гидрогазодинамика. Собрание трудов. М.: Издательство АН СССР, 1953. 544 с.
  17. Монин А.С., Нейман В.Г., Филюшкин Б.Н. О стратификации плотности в океане // ДАН СССР. Т. 191, №6, 1970. С. 1277–1279.
  18. Олвер Ф. Асимптотика и специальные функции. М.: Наука, 1990. 528 с.
  19. Покровский О.М. Температура поверхности океана как индикатор естественных колебаний климата в умеренных и высоких широтах Северного полушария // Исследование Земли из космоса. №6, 2005. С. 3–13.

20. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
21. Фомин Ю.В., Жмур В.В., Марченко А.В. Нестационарная фильтрация морских вод в водоносные слои прибрежной зоны моря // Водные ресурсы. Т. 44, №1, 2017. С. 19–27.
22. Aslamov I.A., Kozlov V.V., Kirillin G.B., Mizandrontsev I.B., Kucher K. M., Makarov M.M., Gornov A.Yu., Granin N.G.. Ice – water heat exchange during ice growth in Lake Baikal // J. of Great Lakes Research. V. 40, 2014. P. 599–607.
23. Buckmaster J. Viscous sheets advancing over dry beds // J. Fluid Mech. Vol. 81, 1977. P. 735–756.
24. Emery W.J., Lee W.G., Magaard L. Geographic distribution of density, Brunt-Vaisala frequency and Rossby radii in the North Pacific and North Atlantic // J. Phys. Oceanogr. 14. 1984. P. 294–317.
25. Gargett A.E. Vertical eddy diffusivity in the ocean interior // J. Mar. Res. 42(2). 1984. P. 359–393.
26. Larsen E.W., Pomraning G.C. Asymptotic analysis of nonlinear Marshak waves // SIAM J. Appl. Math. 39. 1980. P. 201–212.
27. Le Blond P.H. On tidal propagation in shallow rivers // J. Geophys. Res. Vol. 83, C 9, 1978. P. 4717–4721.
28. Levitus S., Antonov J., Boyer T., Stephens C. Warming of the World ocean // Science. 287. 2000. P. 2225–2229.
29. Muskat M. The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media. New York: McGraw-Hill, 1937.
30. Philip J.R. Periodic nonlinear diffusion: an integral relation and its physical consequences // Australian J. Phys. Vol. 26, 1973. P. 513–519.
31. Reid G.C. Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record // J. Geophys. Res. – Atmos. Vol. 96, D 2, 1991. P. 2835–2844.
32. Shimaraev M.N., Troitskaya E.S. and Gnatovskiy R.Yu. 2009. Temperature change of deep waters of Baikal Lake in 1972 – 2007 years // Geography and Nature Resources. N 3, 2009. P. 68–76.
33. Stigebrandt A.A model for the vertical circulation of the Baltic deep water // J. Phys. Oceanogr. 17. 1987.P. 1772–1785.
34. Stefan J. Uber die Theorie der Eisbildung, insbesondere über Eisbildung in Polarmeere // Annalen der Physik. 3rd Ser. 42, 1891. P. 269–286.
35. Zyryanov V.N. Nonlinear pumping in oscillatory diffusive processes: The impact on the ocean deep layers and lakes // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat. N 19, 2014. P. 2131–2139.

# **Исследование процессов переноса загрязняющих веществ в водных объектах: теория и эксперимент**

*В.Ф. Бреховских, В.М. Перекальский, З.В. Волкова,  
В.С. Брезгунов, Г.Н. Вишневская, Е.Р. Кременецкая*

## **Исследование кислородного режима водных объектов**

Интенсивные исследования качества воды в водных объектах (реки, озёра, водохранилища, внутренние моря) начались в 1950-е гг. Это было связано с резким увеличением объёмов неочищенных сточных вод (промышленных и бытовых), сбрасываемых в водоёмы и переносимых течениями на значительные расстояния. Как правило, эти воды содержали значительное количество различных органических веществ (ОВ), в том числе лабильной органики. На биохимическое окисление этой органики расходовалось большое количество растворённого кислорода (РК), что приводило к нарушению кислородного режима и возникновению заморных явлений как летних, (главным образом в стратифицированных водоёмах), так и зимних, которые наблюдались даже в достаточно крупных реках. Естественно, кислородный режим водных объектов детально исследовался в первую очередь экспериментально. Но в то же время стало очевидно, что необходима разработка математических моделей для описания этого режима. В качестве примера можно назвать одномерную модель переноса кислорода из атмосферы в поверхностный слой воды и далее за счёт вертикальной адвекции и диффузии в нижние слои воды (Snodgrass, 1983). Модель такая была использована для расчёта кислородного режима евтрофного водоёма в период ледостава, где к концу зимы в придонных слоях может возникнуть обширная анаэробная зона (Бреховских, Юшманова, 2002).

Задача решалась аналитически при соответствующих начальном и граничном условиях с учётом потребления кислорода в воде и донными отложениями. Как показали расчёты, после достижения нулевой концентрации кислорода у дна наряду с дальнейшим снижением содержания кислорода в столбе воды происходит подъём анаэробной зоны, который продолжается до полного исчезновения кислорода.

Модель, в которой использовались реальные величины параметров, вполне адекватно отразила реальные процессы, происходящие зимой в евтрофных водоёмах. Это показало сопоставление результатов расчёта с данными натурных наблюдений на оз. Белом. Экспериментальные точки, полученные через 128 дней после начала ледостава, достаточно близки к расчётной кривой, соответствующей 134 суткам.

Для водотоков, как правило, уравнение, описывающее динамику РК, сочетается с уравнением, описывающим изменение содержания органических веществ (ОВ) в воде, и оба этих уравнения составляют основу модели качества воды. Поэтому принято говорить о моделях «растворенный кислород – биохимическое потребление кислорода», или РК-БПК моделях.

Одной из ранних моделей качества воды является модель Стрипера-Феллса, представляющая собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Модернизированный вариант модели с переменными коэффициентами и с учётом различных стоков кислорода, был предложен в работе (Dobbins, 1972).

Эта модель была использована нами для оценки влияния сброса неочищенных сточных вод ЦБК на кислородный режим р. Сухоны, притока Северной Двины (Бреховских, Волыян, 1991, Brekhovskikh, Volyan, 1991). В результате поступления сточных вод величины БПК<sub>5</sub> в верхней части реки могут достигать экстремальных значений (25–42 мгО<sub>2</sub>/л). Следствием этого является увеличение дефицита растворённого кислорода (ДРК) на расположенных ниже участках реки в летний период и, особенно, в период ледостава.

Расчёты проводились при следующих допущениях: водный поток стационарный; биохимическое окисление ОВ описывается уравнением реакции 1-го порядка; основной механизм поступления кислорода обусловлен только реаэрацией в летний период (фотосинтез пренебрежимо мал, что было показано нами экспериментально в ходе экспедиционных работ на р. Сухоне). Гидравлические характеристики реки сильно меняются по её длине, что заметно отражается на величине модельных коэффициентов (Бреховских, 1988). Поэтому река была разбита на несколько участков, в пределах каждого из которых были определены средние величины глубины и скорости потока для летней межени (общая длина участка 520 км).

В соответствии с этим определяли величины коэффициентов биохимического окисления и реаэрации как функции скорости и глубины по длине реки. На основании данных лабораторных опытов по кинетике БПК и данных по БПК<sub>5</sub>, полученных постами УГМС на реке за период 1967–82 гг., были определены значения БПК<sub>20</sub>, которые закладывались в расчёт в качестве величины начальной концентрации ОВ для лета и зимы, а также величины начального ДРК. Другие параметры модели определялись экспериментально.

Как показали расчёты, в летний период на кривой ДРК наблюдается явно выраженный максимум, что характерно для водотока, где имеется сосредоточенный источник загрязнения. Зимой, при отсутствии реаэрации, кривая ДРК демонстрирует монотонный рост. Оценки ассимиляционной способности реки с помощью модели и экспериментальных данных показали, что в зимнее время имеет место трёхкратное превышение предельных нагрузок на водоток, что приводит к снижению содержания кислорода на нижнем участке реки до 0,6 мгО<sub>2</sub>/л.

#### **Модельный комплекс для оценки последствий аварийных сбросов сточных вод**

При разработке математических моделей физическое содержание изучаемой задачи формулируется с помощью замкнутой системы дифференциальных уравнений совместно с известными граничными и начальными условиями. Современный уровень математического обеспечения ЭВМ позволяет использовать математические модели в виде программного комплекса, с помощью которого осуществляется не только расчёт, но и выдача результатов в наиболее информативном виде. Здесь рассмотрен один из вариантов, разработанных нами программных комплексов, в постановке «мелкой воды». Характерная особенность метода, который используется в данном программном комплексе, состоит в реализации принципов, возникших первоначально при решении уравнений газовой динамики. Это возможно, поскольку уравнения мелкой воды над горизонтальным дном при отсутствии диссипации и ускорения Кориолиса с точностью до обозначений совпадают с уравнениями для баротропных течений газа с показателем адиабаты, равным двойке. Важным моментом при создании этого метода является использование точного решения соответствующей автомодельной задачи в

численном алгоритме. Благодаря этому подходу удаётся преодолеть сложности расчёта течений при образовании в них гидравлических прыжков, при течении по сухому дну (выход волн на берег при наводнении), при больших градиентах искомых величин, а также русел с переменным рельефом дна. Помимо расчёта течения и мас-сопереноса в программном комплексе предусмотрено применение метода прямого статистического моделирования для расчёта поверх-хностного растекания лёгкой фракции нефти под воздействием течения и ветра. В расчётах учитывается наличие загрязняющих веществ (ЗВ) двух типов: консервативных и неконсервативных.

Комплекс в своём развитии прошёл несколько этапов модерни-зации и в настоящее время включает три блока – гидродинамиче-ский, массопереноса и, удобный для пользователя, интерфейс, создан-ный на основе ГИС ArcView 3.2 (язык Avenue). Интерфейс упрощает техно-логию расчёта с учётом всех основных факторов – расход воды в реке, количество поступивших ЗВ, место и время сброса, температура воды, морфология водного объекта и др. Задание протокола момен-та и места аварии и её характеристик осуществляется пользователем также через интерфейс с использованием электронной карты водно-го объекта. Результаты расчёта выдаются в виде кадров микро филь-ма, которые записываются на диск с указанием времени и со шкалой концентрации загрязняющего вещества.

Основой представленной модели является система дифференци-альных уравнений динамики и массопереноса. Для описания дина-мики использовалась система уравнений мелкой воды, записанная в интегральной форме. Система двухмерных уравнений «мелкой воды» в интегральной форме на произвольной поверхности  $\sigma$  (объ-ема  $W$ ) в пространстве  $(x, y, t)$  имеет вид:

$$\varphi = \begin{bmatrix} H \\ UH \\ VH \end{bmatrix}; \Pi = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial y} \\ g \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left( U^2 + V^2 \right) \\ UVH \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial VH}{\partial x} + U \frac{\partial VH}{\partial y} \end{bmatrix}; \Psi = \begin{bmatrix} 0 \\ gH \frac{\partial z_\partial}{\partial x} + \tau_x \\ gH \frac{\partial z_\partial}{\partial y} + \tau_y \end{bmatrix}$$

где:

где  $H$  – глубина потока жидкости, м;  $U, V$  – соответствующие состав-ляющие по осям координат  $x, y$  осреднённого по глубине вектора скорости  $U$ , м/сек;  $z_\partial$  – отметка дна, м;  $\tau_x, \tau_y$  – компоненты касательных напряжений на дне водоёма.

Уравнение массопереноса для искомой скалярной функции  $C$  (например, значения содержания органики, величины дефицита растворённого кислорода, температура воды) имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + F,$$

где  $F$  – источники ЗВ.

Вид уравнений для наглядности представлен в декартовых координатах, в численном расчёте дискретный аналог решаемых уравнений преобразован на косоугольной сетке, адаптированной к линии берегов и дну водного объекта.

Более подробно постановка задачи изложена в работах [Бреховских, Перекальский, 2002; Перекальский, Абрамов, 2012].

В программном комплексе предусмотрен блок по расчёту динамического взаимодействия двух водных потоков в месте их слияния. Это позволяет в принципе рассчитывать сеть водных объектов по их динамическому взаимодействию и переносу загрязняющих веществ.

Представленная выше модель использовалась для оценки опасности возникновения анаэробной зоны на 550-км участке реки Северная Двина от места слияния рек Вычегды и Малой Северной Двины в результате аварийного сброса ЗВ из очистных сооружений Котласского ЦБК (Бреховских, Перекальский, 2000). Моделировалась ситуация, когда в течение достаточно короткого промежутка времени (10 часов) в реку поступали сточные воды с расходом 17,8 м<sup>3</sup>/сек, в два раза превышающим режимный, и с содержанием ЗВ 750 мг/л. Расчёты проводились для зимней межени при среднемноголетних величинах расходов воды в указанных реках при определённых фоновых значениях содержания органики ( $L$ ) и величины ДРК ( $D$ ) и коэффициента биохимического окисления.

В результате расчётов были получены поля распределения компонентов скорости, глубины потока и величин  $L$  и  $D$  на участке реки от р. Вычегды до р. Пинети. Было показано, что зона загрязнения при своём движении дрейфует от берега к берегу из-за меандрирования русла, причём полное перемешивание наступает на 80 км от исходного створа через 200 часов после окончания сброса. При этом дефицит кислорода в центре облака ЗВ увеличивается на 0,5–0,7 мг/л

по сравнению с его естественным значением, а само облако растягивается по длине более, чем на 200 км. Таким образом, проведенные расчеты показали, что аварийные сбросы сточных вод в зимний период оказывают существенное влияние на гидрохимический режим Северной Двины.

Следующим объектом исследования с помощью описанного выше программного комплекса является устьевой участок Северной Двины, где помимо адекватного учета морфологии и двухмерного характера распространения ЗВ, следует учитывать влияние на динамику потока приливных явлений (Бреховских, Перекальский, 2002). Исследовался процесс распространения ЗВ, поступающих в реку со сточными водами Архангельского ЦБК (главным образом через подводный рассеивающий выпуск). Этот выпуск находится у левого берега реки в 15 км выше г. Архангельска. Необходимость проведения модельных расчётов была обусловлена тем, что ниже по течению на правом берегу расположен главный городской водозабор (2-й км по локции).

Как показали натурные исследования (Бреховских, Овечкина, 1988), в период открытой воды сточные воды распространяются вдоль левого берега довольно узкой полосой, что подтверждается измерениями концентраций различных органических веществ. Однако эта картина заметно меняется в период зимней межени, когда повышенные концентрации ЗВ часто наблюдались на середине реки и даже у её правого берега (Бреховских, Волкова, Колесниченко, 2003). В связи с этим особую опасность представляет ситуация, когда со сточными водами в реку попадают опасные токсические вещества. Такая ситуация, в частности, возникла зимой 1995 г., когда в результате нарушения режима промывки электролизеров в воду попало большое количество ртути (по разным источникам, до нескольких сотен кг.). Очевидно, что прогноз распространения токсиканта и оценка вероятности его попадания в район водозабора могут быть выполнены только с помощью математического моделирования.

Расчётная схема оставалась прежней, но с некоторыми изменениями в граничных условиях. Рассеивающий выпуск ЗВ моделировался заданием соответствующей функции в правой части уравнения массопереноса (3).



Рис. 1. Схема расчётного участка и поле концентраций лигниновых веществ через четверо суток после начала работы рассеивающего выпуска: 1–5 мг/л; 2–10 мг/л; 3–15 мг/л; 4–30 мг/л

Задача гидродинамики решалась на 70-км устьевом участке с подробным описанием геометрии островов и береговой линии, благодаря использованию в дискретизации косоугольной сетки.

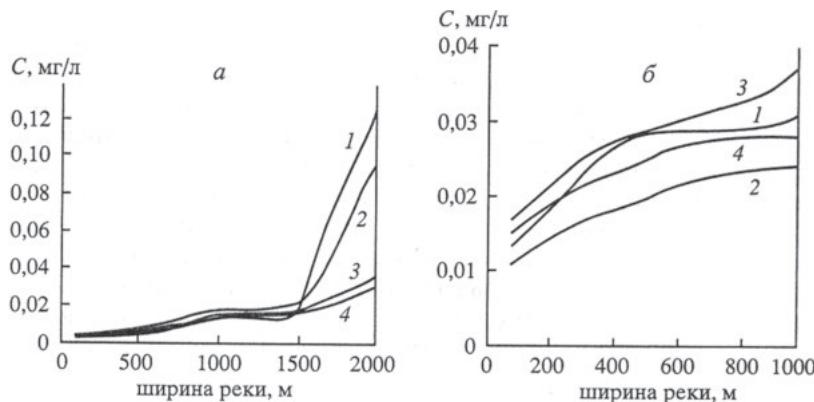


Рис. 2. Изменение концентрации ртути по сечению реки в зоне рассеивающего выпуска (а) и водозабора (б) через четверо суток при малой и полной воде: 1, 2 – соответственно, малая и полная вода второй полусуточной приливной волны; 3, 4 – соответственно, малая и полная вода второй полусуточной приливной волны. Отсчёт расстояния по сечению реки производится от правого к левому берегу

Следует отметить довольно сложный характер течений в указанном районе реки, что обусловлено взаимодействием двух потоков (Северной Двины и протоки Мечка), обтекающих систему островов. Эти острова разделены узкими протоками (при расчёте они были представлены в виде одного острова). Схема расчётного участка (0–33 км) представлена на рис. 1.

Рассматривались два варианта: распространение ЗВ (литниевые вещества) при штатном режиме работы очистных сооружений ЦБК и аварийный сброс, при котором в воду попадает ртуть.

Сравнение результатов расчёта с данными натурных исследований (для летнего периода) показало хорошее совпадение в характере кривых в створе выпуска. Это означает, что модель адекватно описывает ситуацию в реке и с её помощью можно получить картину распределения ЗВ на данном участке реки.

Расчёт последствий аварийного сброса ртути со сточными водами проводился исходя из известных реальных сроков этого события (4 суток). Концентрация ртути в сточных водах принималась равной 5 мг/л, что вполне реально, особенно если учесть, что в тот период концентрация ртути в воде реки в районе выпуска достигала 0,3 мг/л, т.е. 300 ПДК. Результаты расчётов представлены на рис. 2, где показано распределение концентрации ртути по ширине реки в зонах рассеивающего выпуска и водозабора на четвертые сутки для разных фаз прилива. Как видно из рисунка, наблюдается различие в распределении концентрации поперёк реки как при малой, так и полной воде для 1-й и 2-й полусуточных волн прилива.

В зоне водозабора отмечается тенденция к уменьшению концентрации вблизи левого берега и её возрастание у правого берега (до 10–15 ПДК), что подтверждает наличие интенсивного поперечного переноса ЗВ от левого к правому берегу.

Поле скоростей рассчитывалось по уравнению динамики во всей рассматриваемой области с учётом системы островов. В итоге была получена подробная картина течений на участке реки как выше выпуска сточных вод, так и ниже него (вплоть до водозабора). Приведённый расчёт показал, что выше выпуска существует заметное поперечное течение воды, поступающей из протоки Мечка. По-видимому, этим можно объяснить наблюдавшиеся ранее экспериментально зимой повышение концентрации ЗВ на середине реки, а в

одном случае даже равномерное их распределение по всему сечению реки.

Таким образом, выполненные расчёты показали, что сочетание таких факторов, как приливной характер течения в Северной Двине и наличие поперечного адвективного переноса в зоне рассеивающего выпуска, при определённых условиях может способствовать возникновению угрозы загрязнения городского водозабора в период зимней межени.

Далее с помощью программного комплекса была предпринята попытка оценить влияние сточных вод крупного промышленного центра, г. Волгограда, на качество воды в Волге. Здесь помимо промышленных сточных вод рассматривалось воздействие поверхностного ливневого стока с территории города (Бреховских, Кочарян, Перекальский, 2002). В качестве ЗВ рассматривались соединения меди, содержащиеся в сточных водах, и нефтепродукты, которые преобладают в ливневом стоке. В первом случае рассматривались два варианта: работа очистных сооружений в штатном режиме и аварийный сброс. Проведённые расчёты показали, что при штатном режиме сбросов промышленных сточных вод г. Волгограда ( $2 \text{ м}^3/\text{с}$ , содержанием меди  $C=10 \text{ ПДК}$ ), зона загрязнения распространяется на сравнительно малое расстояние вниз по течению (до 3 км.). В варианте увеличенного аварийного сброса промышленных сточных вод (до  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ ) с содержанием меди  $100 \text{ мг}/\text{м}^3$  время сброса предполагалось неограниченным (стационарный источник). Расчётное поле концентраций показывает, что расстояние полного перемешивания составляет 50 км, а фоновое значение достигается через 80 км от места сброса.

С учётом общей площади города, доли непроницаемого покрытия, средней продолжительности осадков и частоты максимальных суточных осадков (20% обеспеченности) была получена оценка расхода максимального ливневого стока ( $31,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ) при концентрации нефтепродуктов  $20 \text{ г}/\text{м}^3$ . Видно, что загрязнённая зона смещается вниз вдоль правого берега, постепенно расширяясь поперёк русла. Полное перемешивание по сечению реки происходит на расстоянии 140 км от Волгограда на третью сутки после окончания ливня. При этом концентрация нефтепродуктов здесь превышает ПДК ( $0,05 \text{ г}/\text{м}^3$ ) в 2–2,5 раза. Таким образом, расчёты с помощью модели показывают,

что ливневый сток с городских территорий может оказывать заметное влияние на качество воды на значительном расстоянии от города.

С помощью комплекса исследовалось влияние аварийного выпуска нефти на участке Нижней Волги от пос. Черный Яр до пос. Никольское, протяжённостью 45 км (Бреховских, Перекальский, Абрамов и др. 2010). Сброс (7 т/сут.) происходил в течение одних суток, затем авария устранилась. При расходе воды в реке 4000 м<sup>3</sup>/с (летне-осенняя межень крайне маловодного года) облако нефти распространялось вниз по течению с понижением концентрации до 3 ПДК к концу расчётного участка. В конце третьих суток после аварии концентрация нефти снижается до фоновой (2 ПДК). При увеличении сброса до 44 т/сут. облако загрязнения в конце вторых суток проходит в районе Никольского с максимальным значением концентрации нефти 4 ПДК вблизи правого берега и значительным распространением поперёк русла. Если расход воды составляет 6000 м<sup>3</sup>/с, загрязнение распространяется на значительно большее расстояние, при этом в конце вторых суток наблюдается заметное снижение концентрации нефти в пятне (до 2–3 ПДК) в районе Никольского (фоновая концентрация достигается за 3–4 суток).

Следующая задача была связана с оценкой последствий возможного аварийного разлива нефти на 250 километровом участке Волги от г. Нижний Новгород до Чебоксарского гидроузла (Перекальский, Абрамов, 2012, Перекальский, Абрамов, Авандеева, 2012). На этом участке в Волгу впадают два крупных притока – реки Сура и Ветлуга (с расходами воды, соответственно 260 и 255 м<sup>3</sup>/с). Расход вводы в Волге принимается равным 3000 м<sup>3</sup>/с. Высокий риск нефтяного загрязнения низовьев Суры и Чебоксарского водохранилища связан, главным образом, с тем, что реку пересекают ветки магистрального нефтепровода. А известно, что коррозионные дефекты могут приводить как к проточкам, так и к крупномасштабным авариям. При проведении расчётов была построена в электронном виде гидрологическая схема течений с учётом особенностей русла, распределения глубин и наличия островов.

Первоначально оценивались последствия протечки из нефтепровода, пересекающего Суру в районе г. Ядрин (объём протечки 3,5 т/сут.). Через сутки сброс нефти был прекращён, и облако нефти,

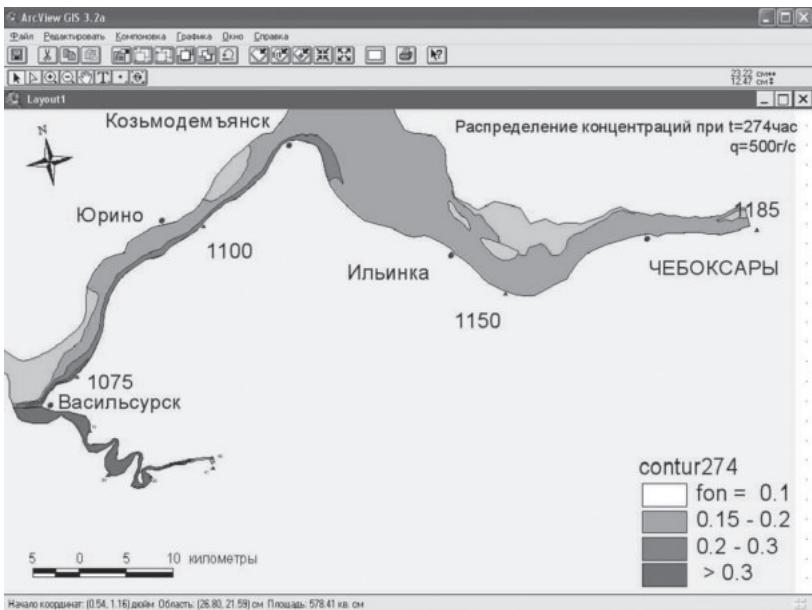


Рис. 3. Распространение нефти при её длительном истечении из нефтепровода в реке Суре

деформируясь, направилось к устью реки. При этом на мелководных участках движение нефти было замедленным по сравнению с глубоководными участками. В целом в результате разбавления и разложения концентрация нефти в воде становится фоновой ( $0,1 \text{ г}/\text{м}^3$ ) ещё до слияния с Волгой.

Аналогичный расчёт был произведён при увеличении суточной утечки нефти до 45 т/сут. В этом случае отмечается увеличение концентрации нефти в Суре по сравнению с предыдущим. Через трое суток после начала утечки нефть попадает в Волгу. В месте слияния Суры и Волги концентрация нефти значительно уменьшается под влиянием менее загрязнённого потока Волги. Нефть прижимается течением к её правому берегу, и происходит дальнейшее разбавление. На мелководных участках Суры наблюдается длительное застывание нефти. Так как через сутки после начала сброса нефти в Суре авария была устранена, на пятые сутки происходит повсеместное снижение концентрации и разрыв облака нефти. Через шесть суток концентрация у правого берега Волги достигает фоновой. Следует

отметить, что концентрация нефти в устье Суры на шестые сутки местами ещё больше 0,3 г/м<sup>3</sup>, но это не приводит к увеличению концентрации нефти выше фоновой в Волге. При длительном (в пределах 20 суток) истечении нефти из нефтепровода во всей Суре и Волге ниже Васильсурска наблюдается двух-трёхкратное превышение концентрации нефти над фоновой. Вблизи правого берега распространяется облако нефти с концентрацией, превышающей фоновую более чем в три раза, но протяжённость этого облака ограничена за счёт разбавления волжской водой (рис. 3).

Таким образом, используемая динамическая модель адекватно рассчитывает поля скорости течения на рассматриваемых участках водного объекта (Волга, Волга-Сура) с включением в расчётную схему перепадов глубин, островов, извилистости берегов. Влияние величины и направления скорости потока и морфологии водного объекта является определяющим в процессе распространения нефти и изменения её концентрации. Вследствие этого картина выглядит достаточно реально, в частности застаивание нефти на мелководных участках.

### **Экспериментальная оценка размеров зоны влияния Астрахани на гидрохимические показатели в рукавах дельты**

Как видно из сказанного выше, с помощью соответствующей модели можно в некоторых случаях грубо оценить воздействие точечных источников загрязнения на качество воды в реке. Однако при исследовании влияния крупной промышленной агломерации, которую нужно рассматривать как распределённый источник ЗВ, возникают серьёзные трудности. В этой ситуации получить ответ можно только с помощью натурного эксперимента, что и было осуществлено в 2007–08 гг. Институтом водных проблем РАН в районе г. Астрахани. Целью экспедиционных исследований была оценка размеров зоны влияния города на гидрохимические показатели в рукавах дельты Волги. С корабля отбирались пробы воды и донных отложений, в которых определяли содержание тяжёлых металлов, нефтяных углеводородов, фенолов и других веществ (Проблемы качества ввод..., 2013). Все анализы выполнялись по стандартным методикам. Всего было выбрано 30 створов, расположенных в русло-вой части реки выше и ниже города, а также по основным рукавам дельты. К югу от города это Бахтемир (крупная транспортная арте-

рия), Старая Волга и Кизань–Камызяк, а в северной части города это Болда (отходит от русла Волги в восточном направлении) и некоторые другие протоки.

Последующий анализ распределения гидрохимических показателей по длине рукавов дельты позволил примерно оценить зону влияния города на качество воды (Бреховских, Волкова, Перекальский, 2015).

Рассмотрим ситуацию в рукаве Бахтемир. Содержание углеводородов (УВ) на входе в рукав снижается по сравнению с содержанием в замыкающем створе о. Ильинский на южной границе города. Это снижение продолжается до створа пос. Бахтемир (примерно 10 км ниже по течению), затем в створе с. Икряное (ещё 10 км ниже) концентрация УВ заметно возрастает (до 2 ПДК), далее через 12 км снижается до 1 ПДК (с. Ямное), а ещё через 14 км вновь возрастает до 3 ПДК (с. Трудфорт). Совершенно очевидно, что этот рост обусловлен какими-то другими источниками, а не влиянием г. Астрахани. Такое распределение концентраций даёт основание считать, что влияние города по УВ распространяется не более, чем на 25–30 км (если считать от южной границы города). Анализ изменения концентрации Hg и Cu в принципе подтверждает сделанный выше вывод.

Достаточно чётко выявляются размеры зоны влияния по распределению Zn. На входе в Бахтемир концентрация Zn несколько ниже, чем в замыкающем створе, далее она понижается до 10 мкг/л (1 ПДК) в створе пос. Бахтемир, а затем возрастает в 1,5 раза в с. Икряное. Этот рост продолжается и дальше к с. Ямное и с. Трудфорт, что говорит о действии местных источников загрязнения, а не г. Астрахани.

Рукав Болда, который отходит от русла Волги в северной части города через 2 км разветвляется на две протоки – Кривая Болда и Прямая Болда, которые обходят большой остров, вытянутый в широтном направлении примерно на 10 км, и вновь сливаются у восточного мыса острова.

Район Прямой Болды плотно заселён, здесь расположено множество промышленных предприятий, судоремонтный завод, причали и т.д. Это обстоятельство заметно отражается на некоторых показателях качества воды, причём в основном в средней части протоки. Как и в предыдущем случае, антропогенное влияние города на качество воды для разных веществ проявляется по-разному. Так,

содержание Cu на входе в рукав Болда из Волги соответствует ПДК, а затем оно возрастает до 3 ПДК в Кривой Болде и до 22 ПДК в середине Прямой Болды, но в месте их слияния оно снижается до 4 ПДК. Далее вниз по течению Болды оно продолжает снижаться до уровня 2 ПДК (через 12 км от этого места), а через 6 км вновь возрастает почти до 8 ПДК. Таким образом, влияние городской агломерации на уровень содержания Cu распространяется не более, чем на 20 км.

Для Zn картина получается более смазанной, хотя и здесь его концентрация максимальна в середине Прямой Болды и заметно снижается к месту слияния. Дальше вниз по течению концентрация Zn несколько возрастает (с 14 до 17 мкг/л) и сохраняется в пределах исследованного участка. Поэтому протяжённость зоны влияния получается даже меньше, чем для Cu.

Анализ изменения содержания Hg в воде даёт следующую картину. На входе в рукав Болда концентрация Hg высока (0,003 мкг/л, или 3 ПДК). Такой она остаётся в Кривой Болде, а в середине Прямой Болды она возрастает до 0,034 мкг/л, а затем в месте слияния снижается до 0,023 мкг/л, сохраняясь на этом уровне на расстоянии 12 км. Ещё через 6 км концентрация Hg становится равной 0,001 мкг/л, т.е. 1 ПДК. Так что и по этому показателю влияние г. Астрахани распространяется на расстояние не более 20 км.

Если судить по углеводородам, их содержание максимальное (почти 3 ПДК) на входе в рукав Болда (т.е. на выходе из Волги); затем оно немного снижается с небольшими колебаниями, а в месте слияния становится равным 0,1 мг/л (2 ПДК). К следующему створу через 12 км концентрация вновь возрастает в 1,4 раза, что уже никак не связано с действием городских стоков. Таким образом, получается, что по НУ зона влияния существенно меньше приведённых выше значений. Следует отметить, что результаты наших исследований совпадают с оценкой зоны влияния г. Астрахани (15–20 км), полученной в работе [Лычагина, Касимов, Лычагин, 1998].

#### **Термогидродинамическая модель водохранилища**

При моделировании кислородного режима водоёмов первостепенное значение имеют гидродинамические и гидрофизические факторы (Бреховских, 1988). Поэтому в современных моделях используются, в частности, полные неупрощённые уравнения тепло-массо-

переноса и гидродинамики с последующей их пространственно-временной дискретизацией и параметризацией процессов подсеточных масштабов. В данном случае задача состояла в построении термогидродинамической модели, отражающей формирование и развитие температурной стратификации в водоёме и проверке её способности моделировать развитие аноксидной зоны в летний период.

Программный комплекс был разработан в двухмерной по вертикали постановке (Перекальский, Кременецкая, 2007).

Используется нестационарная система уравнений гидродинамики и массопереноса, усреднённых по ширине водоёма. В уравнениях массопереноса в качестве искомых скалярных функций являются температура, концентрация кислорода. В качестве факторов, влияющих на решение задачи, рассматриваются известные натурные суточные изменения скорости и направления ветра, изменение температуры и влажности воздуха, взаимодействие с атмосферой, влияние фотосинтеза, аэрации, биохимического окисления, скорости потребления кислорода донными отложениями. Гидродинамические характеристики потока (компоненты скорости) рассчитываются с учётом термохалинных полей в водоёме, морфологии русла, изменения уровня свободной поверхности.

Уравнение для горизонтального импульса представлено в виде:

$$\begin{aligned} \partial(Bu)/\partial t + \partial(Bu^2)/\partial x + \partial(Buw)/\partial z = \\ = -gB\partial(P/\rho_0)/\partial x + x(B(Du/x + \tau)) + z(B(Au/z)) - \alpha u |u| |B/z|, \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение неразрывности:

$$\partial/\partial x(Bu\rho) + \partial/\partial z(Bw\rho) = 0 \quad (5)$$

Уравнение баланса температуры  $T$ :

$$\begin{aligned} \partial(BT)/\partial t + \partial/\partial x(BuT) + \partial/\partial z(BwT) = \\ = \partial/\partial x(BD_f T/\partial x) + \partial/\partial z(BA_f T/\partial z) + (1-\beta)I_o \exp(-\eta z)/\delta z, \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение баланса кислорода  $F$ :

$$\partial(BF)/\partial t + \partial/\partial x(BuF) + \partial/\partial z(BwF) = \partial/\partial x(BD_f \partial F/\partial x) + \partial/\partial z(BA_f \partial F/\partial z) - SF. \quad (7)$$

Подробное описание постановки задачи изложено в работе Перекальский, Кременецкая, 2007.

Одной из задач программного комплекса являлось адекватное натурным наблюдениям получение возникновения, развития и разрушение термоклина под воздействием динамики течения, ветра и

теплового потока. Для оценки содержания взвесей в воде Можайского водохранилища в модели был разработан блок изменения концентраций взвешенного вещества в толще воды, учитывающий образование взвеси в результате продуцирования фитопланктона, взмучивания донных отложений и уменьшение концентрации взвеси в результате её оседания.

Для анализа влияния погодных условий на формирование аноксидной зоны были проведены расчёты для разных температурных условий: слабого прогрева ( $T$  воздуха от 8 до 22°C.), среднего ( $T$  воздуха от 11 до 32°C) и сильного ( $T$  воздуха 15–40°C).

Расчёты показали, что при слабой и средней стратификации (при максимальном градиенте до 5°C/м, и среднем вертикальном градиенте до 0,8 град/м) наилучшие условия по кислороду складываются при слабоевтрофных продукционно-деструкционных процессах. При сильной стратификации при  $T$  поверхности воды >25°C наибольшее среднее содержание  $O_2$  отмечаются при мезотрофных условиях.

При слабой интенсивности продукционно-деструкционных (П-Д) процессов (мезотрофные условия) объём аноксидной зоны независимо от степени стратификации не превышает 6% объёма водохранилища. При средней интенсивности П-Д процессов доля аноксидной зоны достигает 20% объёма водохранилища лишь при сильной стратификации ( $(dT/dz)_{cp} > 1^\circ\text{C}/\text{м}$ ). Высокая интенсивность П-Д процессов приводит к довольно быстрому росту аноксидной зоны. Даже при слабой стратификации водной толщи доля аноксидной зоны уже к 9-му дню счета составляет 15%. А при сильной стратификации доля аноксидной зоны за 12 дней достигает 40% объёма водохранилища.

Сопоставление скоростей формирования аноксидной зоны, оценённых по натурным наблюдениям и рассчитанных по модели, в зависимости от степени стратификации свидетельствуют об адекватности модельных расчётов.

Используя полученные скорости роста аноксидной зоны можно рассчитать максимально возможные объёмы аноксидной зоны за период летней температурной стратификации.

Для верификации модели были использованы данные гидролого-гидрохимических съемок и рейдовых наблюдений, провёденных на Можайском водохранилище летом 1996 г.

### **Массоперенос на границе «вода – донные отложения»**

Проблема массопереноса между водой и донными отложениями (ДО) всегда актуальна, поскольку этот процесс играет важную роль в формировании качества воды. Это особенно важно, если в донных отложениях накапливается большое количество токсичных ЗВ (тяжёлые металлы, нефтяные углеводороды и др.), которые могут переходить в водную толщу. В частности, вынос тяжёлых металлов (ТМ) из ДО может осуществляться биотическим и абиотическим путями. К последним могут быть отнесены диффузия растворённых фракций и твёрдых частиц, десорбция и комплексообразование, происходящие при определённых физикохимических условиях.

Существенное влияние на скорость выноса ТМ оказывает состав ДО, при этом важным агентом выноса является поровый раствор, поскольку он обладает большей подвижностью по сравнению с твёрдой фазой. Поровые воды играют роль аккумулятора и носителя микроэлементов в процессе обмена ЗВ между водой и ДО, причём скорость диффузии определяется разностью концентраций ТМ в ДО водной среде. Именно величина градиента концентраций используется при грубой оценке потоков вещества из ДО на основе закона Фика.

Такие расчёты были выполнены при проведении научно-исследовательских работ на Иваньковском водохранилище в 1990-е гг. (Иваньковское водохранилище, 2000). В ходе этих исследований был собран большой материал по содержанию ТМ в воде и ДО, причём детально изучалось распределение ТМ по высоте отобранных колонок грунта. В качестве примера можно привести результаты расчёта для выноса меди. На основании измеренных величин градиента её концентрации в поровой воде поверхностного слоя и величин пористости и коэффициента диффузии было установлено, что в столб воды может переходить  $0,45 \text{ мг}/\text{м}^3\cdot\text{сут}$ . Это означает, что при наблюдаемом содержании меди в воде около  $5 \text{ мг}/\text{м}^3$  масса поступающего ежесуточно ЗВ достигала примерно 10% от полной величины, т.е. опасность вторичного загрязнения была вполне реальной.

Далее был рассмотрен вопрос о том, как изменится диффузионный поток меди при снижении её содержания в ДО. Здесь для моделирования использовалась двухмерная система уравнений Навье-Стокса и массопереноса, искомыми переменными в которых были функции тока, вихря и концентрации. Поскольку поровая вода предполагалась неподвижной, задача динамики решалась только в области течения над грунтом с соответствующими граничными условиями на входе и выходе из области решения, на свободной поверхности и на дне. В граничных условиях для уравнения массопереноса использовалось фоновое значение концентрации меди в потоке на входе в область решения и экспериментальные данные по распределению концентрации меди в поровой воде грунта Иваньковского водохранилища.

Расчёт проводился при двух типах начального распределения концентрации меди по толщине ДО – равномерного и параболического (оба типа наблюдались в натурных исследованиях). Далее рассчитывались величины диффузионного потока за годовые периоды и удельное количество вещества, поступающего в водоём. Как показали расчёты, уже в течение 1-го года наблюдается резкое уменьшение содержания меди в поровой воде (в 8 раз при параболическом и в 3 раза при равномерном начальном распределении), а к концу 5-го года происходит практически полное очищение поровой воды от меди (по сравнению с фоновым её содержанием в воде). Соответственно, в течение этого периода изменялся и удельный поток меди из ДО: его величина резко снижалась в первые два года (с 8,5 до 2,0 мг/м<sup>3</sup>год для равномерного начального распределения и с 3,4 до 0,4 мг/м<sup>3</sup>год для параболического распределения). Далее темп падения замедлялся, а величина удельного потока в период от 2 до 4 лет была сопоставима с полученной при расчёте по закону Фика.

Следует отметить, что хотя при расчёте не учитывались некоторые стороны процесса (в частности, переход меди из твёрдой фазы в раствор) снижение концентрации меди в поровой воде за указанный период достаточно хорошо отражает результаты натурных исследований на Иваньковском водохранилище в 1990-е гг.

Учёт процессов, происходящих в ДО (сорбция–десорбция) и некоторых характеристик грунта, был осуществлён в работах (Бреховских, Волкова, Перекальский, 2009); Бреховских, Волкова, Перекаль-

ский, 2010) с использованием описанного выше программного комплекса.

Уравнения массопереноса и диффузии записаны относительно концентрации ТМ (меди) в воде, поровой воде и твёрдой фазе ДО (сорбента). Гидродинамические характеристики потока (компоненты скорости) рассчитывались с учётом морфологии русла и изменения уровня свободной поверхности. Поскольку поровая вода предполагалась неподвижной, задача динамики решалась только в области течения над дном.

При относительно низких концентрациях ТМ (как это имело место в нашем для рукавов дельты р.Волги) для описания равновесных концентраций и задания граничных условий в системе «вода–твёрдая фаза» используется изотерма Генри в виде  $C_t = \Gamma \times C_{\infty}$ , где  $C_t$  и  $C_{\infty}$  – концентрации ТМ на твёрдой частице и в поровом растворе, соответственно, а  $\Gamma$  – коэффициент распределения или постоянная изотермы Генри. Значения этого параметра колеблются в очень широком диапазоне. Так, для меди, сорбированной на частицах супеси, величина  $\Gamma$  изменяется в диапазоне от 240 до 1100 мг/л, а в озёрных хилахона достигает 2000 мг/л (Венецианов, Лепихин, 2002). Практически такое же значение было получено в наших исследованиях для мелкодисперсных песчаных илов в дельте Волги (Бреховских, Катунин, Островская и др. 1999; Бреховских, Волкова, Перекальский, 1999).)

С использованием рассчитанного поля скоростей течения из уравнения массопереноса определяли концентрацию меди во всей расчётной области, включая поровую воду (метод сквозного счёта). С помощью данной модели был проведен расчёт изменения концентрации меди при значениях параметров, соответствующих реальным условиям для частиц сорбента размером 40 мкм. Начальное значение постоянной Генри принималось равным 2000 мг/л.

Как показали расчёты, при равновесном состоянии системы «сорбент – поровая вода» поступление металла из поровой воды незначительно. При нарушении этого состояния, которое в нашем случае моделировалось через уменьшение величины  $\Gamma$  (до 1000 мг/л), начинается выход металла в придонный слой воды. Эта ситуация соответствует процессу закисления и десорбции меди, в результате чего в течение первых двух дней происходит рост её концентрации в поровой воде в 1,5 раза (от 5,0 до 7,8 мг/м<sup>3</sup>). В последующие дни кон-

центрация меди в поровой воде снижается. Приблизительно через 8 дней устанавливается новое равновесие, при этом отмечается рост концентрации меди в придонном слое воды (в 1,3 раза). Следует отметить, что увеличение размера частиц (и, соответственно, увеличение пористости) приводит к снижению выхода металла из сорбента в поровый раствор. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению его потока в придонный слой воды.

Процессы массообмена между водой и ДО играют важную роль и в крупных водных объектах, таких как Каспийское море. Тяжёлые металлы, поступающие в Северный Каспий со стоком Волги, переносятся далее в составе взвешенных веществ в Средний и накапливаются в ДО. Здесь концентрации таких металлов, как Cu, Zn, Mn и Ni существенно возрастают. То, что ДО могут вносить существенный вклад в содержание ТМ в водных массах Среднего Каспия, подтверждается данными о распределении Mn в 1994–95 гг: в водных массах Каспийского моря и поровых водах ДО, отобранных в глубинных областях Среднего и Южного Каспия (Брезгунов, Ферронский, 2004, 2006). Содержание Mn в водных массах Среднего и Южного Каспия в этот период значительно превышают его содержание в Северном, при этом максимальные концентрации Mn наблюдаются в глубинных водах Среднего Каспия. Такое поведение Mn находит своё объяснение при рассмотрении распределения этого элемента в поровых водах из колонок осадочных отложений, отобранных в 1994 г. в глубоководных частях Среднего и Южного Каспия (Брезгунов, Ферронский, 2010; Брезгунов, 2014).

Концентрации Mn в поровых водах среднекаспийских колонок значительно превышают соответствующие величины южно-каспийских. Особенno велико содержание Mn в поровых водах колонки, отобранной в северо-западной части Среднего Каспия у основания континентального склона. Здесь концентрации Mn более чем на два порядка превышают соответствующие значения в свободной воде моря и на порядок больше, чем в поровых водах Южного Каспия. Примечательной особенностью вертикального распределения Mn в поровых водах этой колонки является резкое уменьшение его концентрации в самом верхнем 20-см слое. Такое поведение Mn наряду со значимым увеличением его содержания в глубинных водах Среднего Каспия по сравнению с Южным и Северным (рис. 4) явилось

основанием для вывода о том, что донные отложения в районе континентального склона Среднего Каспия являются источником вторичного загрязнения водных масс Каспийского моря этим тяжёлым металлом (Брезгунов и др., 2012; Брезгунов, 2014)...

Сопоставление средних и максимальных концентраций тяжёлых металлов в донных отложениях четырёх полигонов Каспийского моря, позволило сделать вывод, что уровень загрязнения донных отложений глубинных областей Среднего и Южного Каспия существенно превышает соответствующий уровень транзитных зон, через которые происходит вынос антропогенных загрязняющих веществ с водосборных территорий Брезгунов, 2016).

Наиболее опасными с точки зрения вторичного загрязнения водных масс моря следует считать донные отложения в областях свала глубин, прилегающих к транзитным зонам, где максимально содержание тяжёлых металлов и наиболее вероятны изменения окислиительно-восстановительных условий в придонном слое.

Процессы массообмена на границе «вода–донные отложения» могут значительно усиливаться за счёт биологических факторов. Речь идёт о так называемом «биоперемешивании», которое обозначает комбинированное воздействие биоты на твёрдую фазу и поровую воду вблизи поверхности раздела. (Бреховских, Казмирук, Вишневская, 2008). Главными участниками этого процесса являются макробеспозвоночные животные (олигохеты, полихеты, хирономиды, ракообразные и др.). Бентосные организмы могут существенно влиять на биогеохимические процессы в ДО. Создание сети прорытых ходов-каналов и ирригационная деятельность некоторых организмов способствует усилиению обмена растворёнными веществами между водой и ДО, а также влияют на баланс между аэробными и анаэробными процессами в ДО.

Стенки прорытых ходов являются участками повышенной бактериальной активности, где возникают градиенты концентраций. Прокачивание воды по каналам в сочетании с переработкой частиц грунта приводит к увеличению интенсивности кругооборота растворённых веществ в ДО. К настоящему времени накоплен большой фактический материал по влиянию организмов зообентоса на обменные процессы между ДО и водной толщёй, т.е. на интенсивность потоков веществ через границу раздела. Основным способом

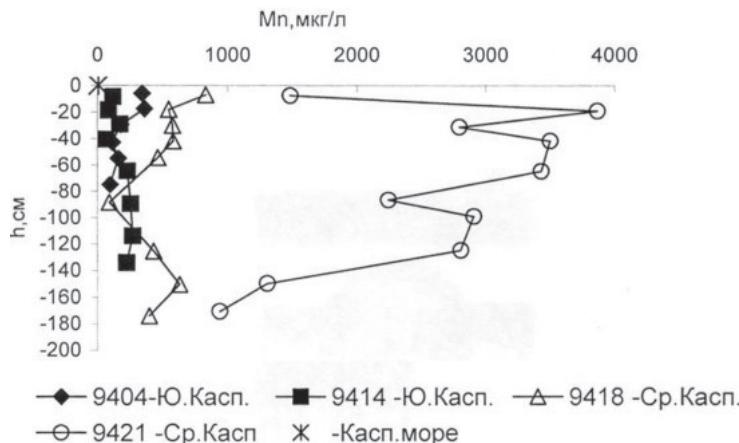


Рис. 4. Содержание Mn в поровых водах колонок донных отложений, отобранных в глубоководных областях Среднего и Южного Каспия  
 1 – контроль (без олигохет); 2, 3 – численность олигохет  $10^2$  и  $10^4$  экз./м<sup>2</sup> соответственно при температуре 25°C; 4 – численность олигохет  $10^4$  экз./м<sup>2</sup> при температуре 10°C

исследования роли биоты в массообмене является эксперимент, причём очень важна методика его проведения (Бреховских, Вишневская, Власова и др. 1990).

Влияние донного населения на обменные процессы в первую очередь связано с изменением физико-химических свойств донных осадков, что определяется образом жизни отдельных групп животных и касается как консервативных элементов, так и редокс-активных металлов, органических и биогенных веществ и др. Адвективный перенос поровой или надиловой воды через границу раздела потенциально является самым главным способом воздействия макробентоса на баланс вещества. Так, во многих работах отмечалось увеличение потоков различных веществ до 10–15 раз по сравнению с потоком, рассчитанным по закону молекулярной диффузии. Вынос материала на поверхность при биоперемешивании имеет важное значение с точки зрения вторичного загрязнения, поскольку это означает, что любое захороненное в ДО токсическое вещество может со временем вновь перейти в воду. Здесь надо учитывать два основных механизма: 1) перемешивание верхнего слоя отложений за счёт деятельности макробентоса и 2) проникновение придонной воды в грунт через систему прорытых организмами ходов с последующим диффузионным обменом через их стенки.

Влияние макробентоса на величину коэффициента переноса растворённого вещества в ДО было показано на основе численного решения обратной задачи диффузии (Бреховских, Габитов, Романов, 1991). За экспериментальную основу были взяты данные по содержанию трития в поровой воде ДО Верхневолжского водохранилища. Колонки грунта, отобранные с помощью трубы ГОИН, разделялись на фрагменты длиной по 20 см, из которых затем с помощью центрифуги выделяли поровую воду. После фильтрования проб воды в них определяли концентрацию трития на жидкостно-сцинтилляционном спектрометре. Уравнение диффузии решалось, исходя из известной функции распределения концентрации трития в воде водохранилища за 1950–85 гг. и скорости осадконакопления при соответствующих начальных и граничных условиях. Расчёты и эксперимент показали, что величина коэффициента массопереноса может превышать молекулярный коэффициент диффузии в 3–6 раз, что можно объяснить только эффектом биоперемешивания.

Тритий в качестве метки при исследовании роли макробентоса в переносе растворённых веществ из ДО был использован в лабораторных экспериментах с олигохетами, которые, как известно, являются доминирующими организмами в загрязнённых водных объектах (Бреховских, Вишневская, Власова и др., 1990). Эти организмы формируют в грунте густую сеть каналов, причём около 95% этих каналов находятся в верхнем слое толщиной примерно 15–16 см. Эксперименты проводились с двумя типами речного грунта – серым илом и песчанистым илом, помещёнными в прямоугольные стеклянные кюветы. Развитие сети каналов при одинаковой плотности организмов ( $5 \cdot 10^4$  экз/м<sup>2</sup>) фиксировали с помощью фотосъёмки через определённые промежутки времени. Общая длина каналов в 1 см<sup>3</sup>ила составила 8 см, а в песчанистом иле – 19 см. Далее грунт подвергался соответствующей обработке и подготовке для опытов по двум схемам: одна была предназначена для определения величины коэффициента диффузии в грунте, а другая – для определения потока трития из ДО в воду.

Детальное описание экспериментов и расчётной схемы (для первого варианта) дано в работе (Бреховских, Вишневская, Власова и др., 1990). На основании определённого экспериментального распределения трития по высоте керна грунта рассчитывались значения коэф-

фициента диффузии, удовлетворяющие этому распределению. Результаты расчёта показали, что в грунте с олигохетами этот коэффициент увеличивался почти в 2 раза для ила и в 1,5 раза для песчанистого ила.

Опыты по измерению потока трития из грунта показали, что по истечении сравнительно небольшого времени, которое требуется олигохетам для освоения территории, поток трития в сосудах с червями становится примерно в 1,9 раза больше, чем в контрольных (поток рассчитывается по приращению концентрации трития в надиловой воде). Сравнение полученных нами результатов с данными других исследователей показывает на достаточно хорошее совпадение [например, в работе (Роббинс, 1981) установлено, что коэффициент диффузии увеличивался в 3 раза в присутствии олигохет]. Поскольку в наших экспериментах использовалось вещество, которое не вступает в реакции и с точки зрения диффузии ведёт себя как обычная вода, можно считать оценку потока вещества из ДО вполне достоверной.

Оценка интенсивности переноса растворённого вещества при наличии каналов в грунте была выполнена также с помощью коэффициента ирригации, который учитывает, помимо биопереноса в вертикальном направлении, молекулярную диффузию вещества через стенки каналов (Бреховских, Вишневская, Власова и др. 1990). Для расчёта этого коэффициента, имеющего размерность [ $\text{см}^{-2}$ ], использовались экспериментальные графики распределения трития по высоте грунта. В результате получим следующие значения:  $B=0,24 \text{ см}^{-2}$  для ила и  $0,35 \text{ см}^{-2}$  для песчанистого ила. Для сравнения отметим, что коэффициент ирригации в верхнем слое морского грунта, рассчитанный на основе данных по распределению сульфатов и радона (Christensen et al., 1984), изменялся в диапазоне от 0,13 до  $0,41 \text{ см}^{-2}$ .

Скорость массопереноса на границе раздела вода–грунт можно оценить, исходя из гипотезы о быстром (по сравнению с молекулярно-диффузионным) перемешиванием вещества под воздействием макробентоса. В этом случае уравнение массообмена выглядит также, как известное уравнение газообмена (McCaffrey et al., 1980). Из решения уравнения находится константа скорости  $K$ , а скорость массопереноса определяется из соотношения  $K_s=Kh$ , где  $h$  – толщина слоя воды над грунтом. В данном случае величину  $K_s$  можно рассматри-

вать как скорость биопрокачивания, т.е. как объём жидкости, переносимой в единицу времени на единицу площади поверхности грунта. Расчёты, выполненные на основании наших экспериментов с тритием, дали следующие результаты:  $K_s=0,32$  и  $0,56$  см/сут соответственно для грунта контрольного и с олигохетами. Здесь интересно отметить совпадение наших данных с данными экспериментов с радиоизотопами натрия (McCaffrey et al., 1980): константа скорости (коэффициент переноса) изменялась в диапазоне  $0,04\text{--}0,11$  сут $^{-1}$ , а скорость биопрокачивания составила примерно  $0,7$  см/сут.

### **Влияние макробентоса на размыв донных отложений**

Роль макробентоса не ограничивается увеличением интенсивности обмена растворёнными веществами между донными отложениями и водой. Не менее важным представляется тот факт, что в результате жизнедеятельности бентосных организмов существенно трансформируются и физико-механические свойства грунта. Изменяются объёмные характеристики и структура грунта (пористость, компактность, сцепление частиц), а также шероховатость, и следовательно, величина касательных напряжений. В целом же биологические эффекты весьма разнообразны и зависят от многих факторов, в частности от состава грунта, видового состава и количества организмов, а также времени года. Очевидно, что вследствие всех этих трансформаций должна измениться и критическая скорость потока, при которой начинается перемещение частиц грунта и увеличение концентрации взвешенных веществ. Таким образом, в присутствии роющих организмов мы практически наблюдаем переход от связного грунта, имеющего хорошее сцепление, к несвязному, легко размываемому.

Начиная с 1970-х гг. проводилось много экспериментальных исследований в этом направлении, в основном на морских грунтах. Использовались гидравлические лотки различных конструкций, с разными грунтами и видами животных, вплоть до моллюсков.

Для оценки влияния пресноводных представителей макробентоса на размыв донных отложений нами была выполнена серия лабораторных экспериментов (Бреховских, Вишневская, Дебольский и др. 1988; Brekhovskikh et al., 1991). Эксперименты проводились с двумя группами бентосных организмов – олигохетами, в составе которых преобладали тубифициды (*Tubifex tubifex*), иличинками хирономид, среди

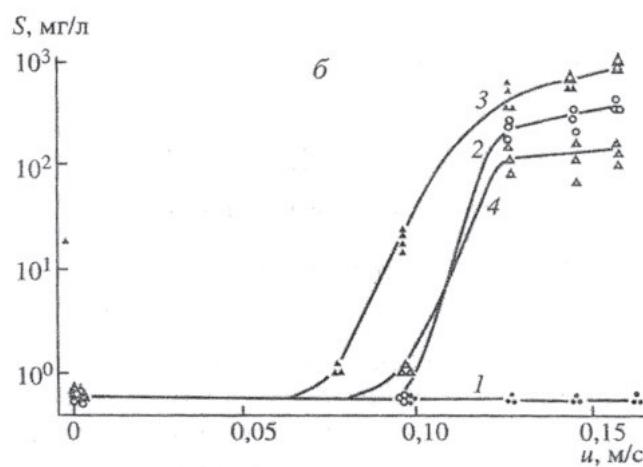
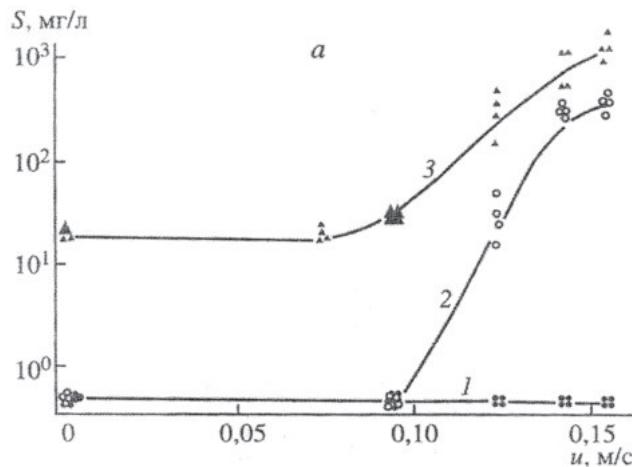


Рис. 5. Зависимость концентрации взвешенных веществ в потоке от скорости течения, численности организмов бентоса и температуры для ила (а) и илистого песка (б)

которых преобладала мотыль (*Chironomus plumosus*). Опыты по размыву грунта проводились в кольцевых каналах, выполненных из оргстекла (детали подготовки и проведения опытов изложены в указанных выше работах). В качестве грунта использовали серый речной ил и илистый песок; максимальная плотность посадки олигохет в опытах была близка к естественной численности в евтроф-

ном водоёме. В ходе экспериментов измеряли содержание взвешенных веществ в воде над грунтом при различных скоростях течения.

Результаты опытов с олигохетами в илистом песке представлены на рис. 5, из которого видно, что в их присутствии содержание взвеси в потоке начинает резко возрастать по достижении определённой скорости течения. Очевидно, также, что плотность посадки и температура воды играют существенную роль: понижение температуры на 15°C при одинаковой исходной плотности привело к уменьшению в 4–5 раз содержания взвешенных веществ в потоке.

Опыты с хирономидами также продемонстрировали их влияние на размыв грунта, но здесь имелись свои особенности. Дело в том, что в отличие от олигохет личинки хирономид не создавали сети каналов в грунте, а строили на его поверхности трубки-домики, высота которых достигала 0,5–1,0 см. Расчёты, выполненные по методике (Мирцхулава, 1967), показали, что в нашем случае неразмывающая донная скорость была равна 0,07 м/с, а размывающая – 0,1 м/с, что достаточно хорошо совпадает с экспериментом.

Роль бентоса можно оценить также через изменение касательных напряжений на поверхности грунта. Эти напряжения могут быть рассчитаны по обычной формуле  $\tau = \rho u_*^2$ , где  $\rho$  – плотность воды,  $u_*$  – динамическая скорость, которая определяется через среднюю скорость потока. Используя значения скоростей, наблюдавшихся в наших экспериментах (от 0,05 до 0,25 м/с), и сопоставляя их с графиками изменения мутности, получили, что в контрольном грунте критическое максимальное напряжение  $\phi_c$  составило не менее 0,17 Н/м<sup>2</sup>, а при наличии олигохетоносизилось до 0,02–0,03 Н/м<sup>2</sup> (Бреховских и др., 1991). Эти цифры хорошо согласуются с данными других исследователей, например (Terwindt, 1977). Нужно заметить, что в 1970-х гг. и позже проблеме влияния макробентоса на структуру донных отложений и их физико-механические свойства уделялось очень большое внимание, что выразилось в соответствующем количестве публикаций.

Увеличению размыва илистых ДО может способствовать ещё один биологический фактор – обрастание мелких частиц микроорганизмами (Бреховских, Золотарева, 1985; Brekhovskikh et al., 1991). Наличие этих организмов, среди которых наиболее распространены нитчатые бактерии и простейшие (в основном сидячие инфузории),

уменьшает фактическую плотность образовавшегося комплекса и увеличивает эквивалентный диаметр. Это сказывается на величине гидравлической крупности частиц и на критическом значении влекущей силы, что должно отразиться на транспорте взвешенных наносов.

Микроскопический анализ поверхностного слоя донных отложений различного типа показал, что на частицах размером 5–100 мкм наиболее часто встречаются нитчатые бактерии и инфузории (Бреховских, Золотарева, 1985; Brekhovskikh et al., 1991). При этом доля частиц, на которых обитали одни нитчатые бактерии, составляла от 37 до 83%, а доля частиц, на которых обитают нитчатые бактерии и простейшие – от 29 до 45%.

Проведённые расчёты показали, что обрастание частиц заметно сказывается на величине их гидравлической крупности. При наличии 2–5 инфузорий этот показатель для частиц размером 30 мкм уменьшается в 2 раза. Если же на частице еще имеются нитчатые бактерии, гидравлическая крупность уменьшается в 1,5 раза даже для частиц размером 50 мкм. Расчёты критического значения влекущей силы для частиц песка размером 10 мкм, находящихся на поверхности грунта, показали, что оно может снижаться в 10 раз при обрастании инфузориями. Для частиц размером 50 мкм этот эффект заметно слабее – уменьшение всего в 2 раза.

Таким образом, можно утверждать, что эффект обрастания частиц может заметно сказываться на транспорте взвешенных наносов в реальных водоёмах, особенно в периоды массового развития простейших организмов (май–июнь, август–сентябрь). Количество же бактерий в грунте всегда достаточно велико, (до 1–2 млрд и более на 1 г грунта в летний период).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Snodgrass W.J. Reaeration and vertical diffusion of lake oxygen//J. Environ. Eng. Vol. 109, №6, 1983. P.1419–1429.
2. Бреховских В.Ф., Юшманова О.О. Моделирование кислородного режима водоемов в зимний период // Инж. экология. №5, 2002. С. 15–22.
3. Бреховских В.Ф., Вольпян Г.В. Моделирование кислородного режима р. Сухоны с учетом антропогенного воздействия // Водные ресурсы. №4, 1991. С. 198–201
4. Brekhovskikh V.F., Volpian G.V. Northern river: BOD-DO model / Proc. Of The Northern hydrology. Symp., Saskatoon, Canada, 1990. P. 532–536.

5. Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука. 1988. 168 с.
6. Бреховских В.Ф., Перекальский В.М. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в приливном устье Северной Двины // Метеорология и гидрология. №12, 2002. С. 86–93.
7. Бреховских В.Ф., Перекальский В.М. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в Северной Двине // Водные ресурсы. Т 27, №5. 2000. С. 574–578
8. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Колесниченко Н.Н. Проблемы качества поверхностных вод в бассейне Северной Двины. М.: Наука, 2003. 233 с.
9. Brekhovskikh V.F., Debol'skaya E.I., Debol'skii V.K., Mordasov M.A. A study into The processes of pollution spreading in tidal mouths of Northern rivers // Water Resources. T. 24, №5. 1997. С. 490–494
10. Бреховских В.Ф., Перекальский В.М. Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ в приливном устье Северной Двины // Метеорология и гидрология. №12, 2002. С. 86–93.
11. Перекальский В.М., Абрамов Н.Н. Математическая модель распространения загрязняющих веществ в водном объекте // Вода: химия и экология. №4, 2012. С. 21–25
12. Перекальский В.М., Абрамов Н.Н., Авандеева О.П. Моделирование динамики течения и массопереноса в речных системах // Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике. Сб. научных трудов. Новочеркасск: ЮРГТН (НПИ), 2012. С. 300–305.
13. Проблемы качества вод Нижней Волги и Северного Каспия. М.: Типография Россельхозакадемии. 2013. 300 с.
14. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Перекальский В.М. Методические подходы к оценке зоны влияния крупных промышленных центров на качество воды в реке. Сб. научных трудов. Т. 1.: Всероссийская научная конференция «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» Петрозаводск, 2015. С. 256–262.
15. Лычагина Н.Ю., Касимов Н.С., Лычагин М.Ю. Биогеохимия макрофитов дельты Волги. (Геэкология Прикаспия. Вып.4). М.: Географический факультет МГУ, 1998. 84 с.
16. Перекальский В.М., Кременецкая Е.Р. Математическое моделирование термогидродинамического и кислородного режимов водоема // Метеорология и гидрология. №6, 2007. С. 60–72.
17. Иваньковское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344с.
18. Brekhovskikh V.F., Perekal'skii V.M., Katunin D.N., Ostrovskaya E.A., Popova O.V Heavy metal transportation and accumulation processes in the Lower Volga river // Water Resources. T. 26, №4, 1999. С. 400–410.
19. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Перекальский В.М. К проблеме вторичного загрязнения водных объектов // Инженерная экология. №5, 1999. С. 18–23.
20. Брезгунов В.С., Ферронский В.И. Закономерности пространственного распределения ряда макро- и микроэлементов в водных массах Каспийского моря. // Водные ресурсы. Т. 33, №5, 2006. С. 630–636.

21. Брезгунов В.С., Ферронский В.И. Макро- и микроэлементы в поровых водах глубинных областей Южного и Среднего Каспия // Водные ресурсы. Т. 37, №6, 2010. С. 700–708.
22. Брезгунов В.С., Бреховских В.Ф., Монахов С.К., Волкова З.В. О возможном влиянии Среднего Каспия на качество воды в Северном Каспии // Вода: химия и экология. №8, 2012. С. 16–21.
23. Брезгунов В.С. Содержание Mn и P в поровых водах Среднего и Южного Каспия в связи с оценкой геохимического состояния Каспийского моря // Вода: химия и экология. №7, 2014. С. 24–28.
24. Брезгунов В.С. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях Каспийского моря // Вода: химия и экология. №6, 2016. С. 78–82.
25. Бреховских В.Ф., Казмирук В.Д., Вишневская Г.Н. Биота в процессах массопереноса в водных объектах. Российская академия наук, Ин-т водных проблем. М.: Наука. 2008. 315 с.
26. Brekhovskikh V.F., Vishnevskaya G.N., Vlasova L.S., Mordasov M.A., Romanov V.V Effect of macrobentos on mass transfer in bottom sediments // Water Resources. T. 17, №1, 1990. С. 83–88.
27. Бреховских В.Ф., Габитов И.Р., Романов В.В. Моделирование процессов массопереноса в донных отложениях // Водные ресурсы. №6, 1991. С. 30–36.
28. Роббинс Дж.А. Некоторые аспекты взаимодействия между бентосом и осадками в Северо-американских Великих озерах и воздействие на них токсикантов // Теоретические вопросы водной токсикологии. М.: Наука, 1981. С. 131–147.
29. Christensen J.P., Devol A.H., Smethie W.M. Biological enhancement of solute exchange between sediments and bottom water on the Washington continental shelf // Continent.Shelf. Res. Vol. 3, №1, 1984. P. 9–23.
30. McCaffrey R.J., Myers A.C., Davey E. et all. The relation between pore-water chemistry and benthic fluxes of nutrients and manganese in Narragansett Bay, Rhode Island // Limnol and Oceanogr. Vol. 25, 1980. P. 31–44.
31. Бреховских В.Ф., Вишневская Г.Н., Дебольский В.К. и др. Влияние бентоса на размыв донных отложений // Водные ресурсы. №3, 1988. С. 103–109.
32. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967. 179 с.
33. Terwindt J.H. Deposition, transportation and erosion of mud // Interaction between sediments and fresh / Ed. By H.L. Golterman. The Hague: Dr. Junk, 1977. P. 19–24.
34. Бреховских В.Ф., Золотарева Н.С. К оценке влияния биологических факторов на транспорт взвешенных наносов // Водные ресурсы. №5, 1985. С. 81–83.

# **Кинетический изотопный эффект как следствие динамики химических и биологических процессов: образование метана и его аэробное и анаэробное окисление**

Работа осуществлена при поддержке Российского Научного Фонда  
(проект №17-17-01204)

*В.А. Вавилин*

Динамика фракционирования стабильных изотопов является следствием динамики химических и биологических процессов, а фактор фракционирования  $\delta$ , определяемый отношением логарифмов скоростей изменения концентраций «лёгкого» и «тяжёлого» субстратов, не зависит от типа кинетики. Исследованные процессы включали образование метана (изотопы углерода) и его аэробное и анаэробное окисление (изотопы углерода, водорода и серы). Эти процессы протекают как в водной толще, так и в почве и донных отложениях, а поступающий в атмосферу метан влияет на общий температурный баланс в биосфере. Математическое моделирование показало, что динамика перераспределения стабильных изотопов в ходе исследованных химико-биологических процессов позволяет уточнить метаболический путь превращения субстрата и определить соответствующие кинетические параметры.

В изотопных исследованиях обычно рассматривают два основных типа изотопных эффектов – термодинамические и кинетические [2, 3]. Кинетический изотопный эффект заключается в изменении скорости химической реакции при замене в молекуле реагирующего вещества какого-либо атома его изотопом. Поскольку в веществе «тяжёлого» изотопа много меньше, чем «лёгкого», отношение изотопов обычно выражается [7] через установленные международные стандарты в промиллях (‰):

$$\delta[\text{‰}] = 10^3 \left( \frac{R}{R_{std}} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $R$  и  $R_{std}$  соотношения изотопов в образце и стандарте.

Уравнение Релея [23], изначально предложенное для описания фракционирования при диффузии смеси газов, применяется и для вычисления фракционирования стабильных изотопов:

$$R_t/R_0 = (S_t/S_0)^{(1/\alpha-1)} \quad (2)$$

где  $R_0$  и  $R_t$ ,  $S_0$  и  $S_t$  – отношение изотопов в субстрате и сами концентрации субстратов в начале реакции и в момент  $t$ , соответственно;  $\alpha$  – коэффициент фракционирования изотопов между субстратом и продуктом в закрытой и полностью перемешиваемой системе. Величина  $\alpha$  определяется по наклону прямой линии [20], полученной в двойных логарифмических координатах, следующих из уравнения (2). Уравнения Релея (2) традиционно выводится, допуская справедливость реакции 1-го порядка по концентрации субстрата с «лёгким» и «тяжёлым» изотопом. При этом коэффициент фракционирования изотопов определяется как  $\alpha = k_{light}/k_{heavy}$  т.е. отношением констант скоростей реакции 1-го порядка для субстрата с «лёгким» и «тяжёлым» изотопом. Реакция для субстрата с «лёгким» изотопом идёт несколько быстрее, чем реакция с «тяжёлым» изотопом.

В ходе реакции величина  $\alpha$  с хорошей точностью может считаться постоянной, что привело к общепринятому мнению о распространённости реакций 1-го порядка в изотопных превращениях. Допуская, что концентрация субстрата с «лёгким» изотопом много больше концентрации субстрата с «тяжёлым» изотопом, динамика субстрата с более «тяжёлым» изотопом может быть выражена через динамику общего субстрата с «тяжёлым» и «лёгким» изотопом:

$$\frac{dS^h}{dt} = -\frac{S^h}{S} \frac{1}{\alpha} \frac{dS}{dt}, \quad (3)$$

где  $S^h/S$  является фракцией тяжелого изотопа в субстрате  $S=S^1+S^h \approx S^1$  ( $l$  подразумевает «лёгкий» субстрат);  $\alpha$  – коэффициент фракционирования изотопов. Количественное описание хода химической реакции во времени в зависимости от концентраций реагирующих веществ изучает формальная химическая кинетика, тогда как теория абсолютных скоростей реакции позволяет рассчитывать скорости реакций, исходя непосредственно из свойств реагирующих молекул. В микробиологических исследованиях наибольшую известность получила модель Моно, описывающая зависимость скорости реакции от концентрации субстрата и биомассы [1].

Уравнение Релея, широко цитируемое в литературе, фактически не описывает динамику процесса. Однако, уравнение Релея справедливо для любого типа кинетики субстрата [28]. Лишь немногие публикации рассматривают фракционирование стабильных изотопов, происходящее в результате изменений в динамической системе

(например, [18, 24, 26]). В нашей работе делается вывод, что динамика фракционирования стабильных изотопов является следствием динамики химических и биологических процессов. Перераспределение стабильных изотопов позволяет уточнить метаболический путь утилизации субстрата и определить соответствующие кинетические параметры.

### Основы математического описания динамики перераспределения изотопов в ходе химических и биологических процессов

При математическом описании динамики более тяжёлых стабильных изотопов, содержащихся в субстрате, продукте и биомассе, можно выделить следующие этапы:

(1) составление корректных стехиометрических химических уравнений, основанных на балансе биофильных химических элементов ( $E$ ), таких как углерод  $C$ , водород  $H$ , кислород  $O$ , азот  $N$  и сера  $S$ :

$$aE_{\text{Субстрат}} = bE_{\text{Биомасса}} + cE_{\text{Продукт}} \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – стехиометрические коэффициенты;

(2) запись динамических уравнений для концентраций субстрата, продукта и биомассы, не учитывая их изотопный состав и опираясь на общий материальный баланс:

$$\frac{dS}{dt} = -ac, \quad \frac{dB}{dt} = +bc, \quad \frac{dP}{dt} = +cc, \quad (5)$$

где  $c$  – скорость процесса (часто в виде зависимости Моно), описывающая уменьшение и увеличение концентраций субстрата, продукта и биомассы;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – константы;

(3) запись динамических уравнений для концентраций более тяжёлых стабильных изотопов, содержащихся в субстрате, продукте и биомассе, опираясь на баланс тяжёлых изотопов:

$$\begin{aligned} \frac{d^h S}{dt} &= -\frac{^h S}{S} \frac{1}{\alpha} \frac{dS}{dt} \\ \frac{d^h B}{dt} &= +\frac{^h S}{S} \frac{1}{\alpha} \frac{dB}{dt} \\ \frac{d^h P}{dt} &= +\frac{^h S}{S} \frac{1}{\alpha} \frac{dP}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

где индекс  $h$  обозначает более тяжёлый изотоп,  $\alpha$  – фактор фракционирования стабильного изотопа.

В качестве субстрата и продукта реакции могут быть газы, такие как метан и диоксид углерода. Скорость массообмена ( $TR$ ) между растворённой и газовой формами метана и диоксида углерода пропорциональна разности концентрации растворённого газа  $S$  и его равновесной концентрации  $S^*$ , умноженной на коэффициент массообмена  $K_L$ :

$$TR = K_L(S^* - S) \quad (7)$$

В свою очередь, равновесная концентрация  $S^*$  растворенного газа есть произведение парциального давления газа и его растворимости.

Для проточного реактора уравнения должны быть дополнены непрерывно поступающими на вход и выходящими концентрациями общего и тяжёлого субстрата, продукта и биомассы [1]:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{T} (Q_{\text{вход}} - Q_{\text{выход}}), \quad (8)$$

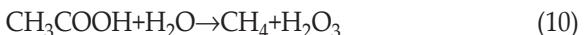
где  $Q$  – концентрации общего и тяжёлого субстрата, продукта и биомассы,  $T$  – время пребывания жидкости в реакторе. При этом концентрация более тяжёлого входящего субстрата, продукта и биомассы много меньше, чем концентрация общего субстрата, продукта и биомассы.

### **Образование метана и фракционирование изотопов углерода**

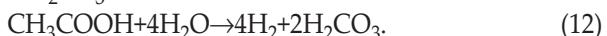
Метан является вторым наиболее важным парниковым газом, концентрация которого значительно увеличивается в результате деятельности человека, способствуя глобальному потеплению [15, 32]. В процессе образования метана из целлюлозного материала ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> принимают участие несколько типов микроорганизмов, осуществляя деполимеризацию (гидролиз), ферментативный кислотогенез, ацетогенез и метаногенез. Основным продуктом ферментативного разложения целлюлозы являются моносахариды, которые в дальнейшем трансформируются в летучие жирные кислоты (ЛЖК), такие как ацетат, водород ( $H_2$ ) и диоксид углерода ( $CO_2$ ):



Основными субстратами для метаногенных микроорганизмов являются ацетат и водород/диоксид углерода, соответственно [34]:



Традиционно считается [6], что вклад ацетокластического метаногенеза составляет около 70% общей продукции метана. Однако относительный вклад различных ацетокластических и гидрогенотрофных метаногенных микроорганизмов в образование метана может определяться факторами окружающей среды, типом анаэробного реактора и режимом проведения процесса, а также составом микроорганизмов в инокуляте [8]. Так, при термофильных условиях и в присутствии ингибиторов, таких как аммоний и летучие жирные кислоты (ЛЖК), доминирующим механизмом метанообразования является процесс, при котором ацетат предварительно окисляется до  $H_2$  и  $H_2CO_3$ :



Эта реакция, осуществляемая ацетат-окисляющими микроорганизмами, происходит синтрофно с водородотрофными метаногенами, трансформирующими  $H_2$  и  $H_2CO_3$  в  $CH_4$ .

Поскольку фракционирование изотопов углерода в результате ацетокластического и водородотрофного метаногенеза резко отличаются, для определения доминирующего пути образования метана часто используется следующее выражение для кажущейся величины коэффициента фракционирования  $\delta_c$  [31]:

$$\alpha_c^{app} = \frac{\delta^{13}C_{CO_2} + 1000}{\delta^{13}C_{CH_4} + 1000}. \quad (13)$$

Стехиометрические уравнения реакций (9) – (12) и соответствующие динамические уравнения содержатся в работе [30].

Не учитывая изотопный состав, образование метана из целлюлозы описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dCel}{dt} &= -k_h Cel \\ \frac{dAc}{dt} &= 2k_h Cel - c_{AcOx} - c_{Sar} - c_{Sae} \\ \frac{dH_2}{dt} &= 4k_h Cel + (4 - 10Y_{AcOx}) c_{AcOx} - (4 - 10Y_{H_2/CO_2}) c_{meth}^{H_2/CO_2} \quad (14) \\ \frac{dCO_2}{dt} &= 2k_h Cel + (2 - 5Y_{AcOx}) c_{AcOx} + (1 - 2,5Y_{Sar}) c_{Sar} + \\ &\quad + (1 - 2,5Y_{Sae}) c_{Sae} - c_{meth}^{H_2/CO_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d\text{CH}_4}{dt} &= (1-2,5Y_{Sar})c_{Sar} + (1-2,5Y_{Sae})c_{Sae} + (1-5Y_{H_2/\text{CO}_2})c_{meth}^{\text{H}_2/\text{CO}_2} \\
\frac{dB_{AcOx}}{dt} &= Y_{AcOx}c_{AcOx} - k_{dAcOx}B_{AcOx} \\
\frac{dB_{Sar}}{dt} &= Y_{Sar}c_{Sae} - k_{dSar}B_{Sar} \\
\frac{dB_{Sae}}{dt} &= Y_{Sae}c_{Sae} - k_{dSae}B_{Sae} \\
\frac{dB_{H_2-meth}}{dt} &= Y_{H_2/\text{CO}_2}c_{meth}^{\text{H}_2/\text{CO}_2} - k_{dH_2-meth}B_{H_2-meth}
\end{aligned} \tag{14}$$

Динамика изменений  $^{13}\text{C}$  в субстрате в ходе превращения целлюлозы в метан и диоксид углерода, промежуточных продуктах и биомассе описывалась следующей системой дифференциальных уравнений [30]:

$$\begin{aligned}
\frac{d^{13}\text{C}_{Cel}}{dt} &= -\frac{^{13}\text{C}_{Cel}}{Cel} \cdot \frac{1}{\alpha_{Cel}} k_h Cel \\
\frac{^{13}\text{C}_{Ac}}{dt} &= -\frac{^{13}\text{C}_{Ac}}{Ac} \left( \frac{1}{\alpha_{AcOx}} c_{AcOx} + \frac{1}{\alpha_{Sar}} c_{Sar} + \frac{1}{\alpha_{Sae}} c_{Sae} \right) + 2 \frac{^{13}\text{C}_{Cel}}{Cel} \frac{1}{\alpha_{Cel}} k_h Cel \\
\frac{d^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}}{dt} &= 2 \frac{^{13}\text{C}_{Cel}}{Cel} \frac{1}{\alpha_{Cel}} k_h Cel + \frac{^{13}\text{C}_{Ac}}{Ac} \times \\
&\times \left( \frac{1}{\alpha_{Sar}} (1-2,5Y_{Sar}) c_{Sar} + \frac{1}{\alpha_{Sae}} (1-2,5Y_{Sae}) c_{Sae} + (2-5Y_{AcOx}) \frac{1}{\alpha_{AcOx}} c_{AcOx} \right) - \\
&- \frac{^{13}\text{CO}_2}{\text{CO}_2} \frac{1}{\alpha_{H_2/\text{CO}_2}} c_{meth}^{\text{H}_2/\text{CO}_2} \\
\frac{d^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}}{dt} &= \frac{^{13}\text{C}_{Ac}}{Ac} \left( \frac{1}{\alpha_{Sar}} (1-2,5Y_{Sar}) c_{Sar} + \frac{1}{\alpha_{Sae}} (1-2,5Y_{Sae}) c_{Sae} \right) + \\
&+ \frac{^{13}\text{CO}_2}{\text{CO}_2} \frac{1}{\alpha_{H_2/\text{CO}_2}} (1-5Y_{H_2/\text{CO}_2}) c_{meth}^{\text{H}_2/\text{CO}_2} \\
\frac{d^{13}\text{C}_{B_{Sar}}}{dt} &= \frac{^{13}\text{C}_{Ac}}{Ac} \frac{1}{\alpha_{Sar}} Y_{Sar} c_{Sar} - k_{dSar}^{13}\text{C} B_{Sar} \\
\frac{d^{13}\text{C}_{B_{Sae}}}{dt} &= \frac{^{13}\text{C}_{Ac}}{Ac} \frac{1}{\alpha_{Sae}} Y_{Sae} c_{Sae} - k_{dSae}^{13}\text{C} B_{Sae} \\
\frac{d^{13}\text{C}_{B_{AcOx}}}{dt} &= \frac{^{13}\text{C}_{Ac}}{Ac} \frac{1}{\alpha_{AcOx}} Y_{AcOx} c_{AcOx} - k_{dAcOx}^{13}\text{C} B_{AcOx}
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\frac{d^{13}\text{C}B_{\text{H}_2/\text{CO}_2}}{dt} = \frac{^{13}\text{C}\text{CO}_2}{\text{CO}_2} \frac{1}{\alpha_{\text{H}_2/\text{CO}_2}} \gamma_{\text{H}_2/\text{CO}_2} c_{\text{meth}}^{\text{H}_2/\text{CO}_2} - k_d \text{H}_2/\text{CO}_2^{13}\text{C}B_{\text{H}_2/\text{CO}_2} \quad (15)$$

где  $^{13}\text{C}B_{\text{Sae}}$ ,  $^{13}\text{C}B_{\text{AcOx}}$  и  $^{13}\text{C}B_{\text{H}_2-\text{meth}}$  – концентрации «болеетяжёлой» биомассы ацетатокластических метаногенов *Methanosaeca*, *Methanosaeta*, ацетат-окисляющих бактерий и водородотрофных метаногенов, соответственно, содержащих  $^{13}\text{C}$ ;  $\alpha_{\text{Cel}}$ ,  $\alpha_{\text{Sar}}$ ,  $\alpha_{\text{Sae}}$ ,  $\alpha_{\text{AcOx}}$ ,  $\alpha_{\text{H}_2/\text{O}_2}$  – соответствующие факторы изотопного фракционирования по углероду в процессе гидролиза и кислотогенеза, ацетокластического метаногенеза, осуществляемого ацетатокластическими метаногенами *Methanosaeca* и *Methanosaeta* окисления ацетата и водородотрофного метаногенеза.

Численные расчёты выполнялись с помощью пакета МАТЛАБ [21], с использованием функции *ode15s* и *ode23s*. На рис. 1 показана динамика образования метана из целлюлозы. При высокой начальной концентрации ацетат-окисляющих бактерий, имеющих более высо-

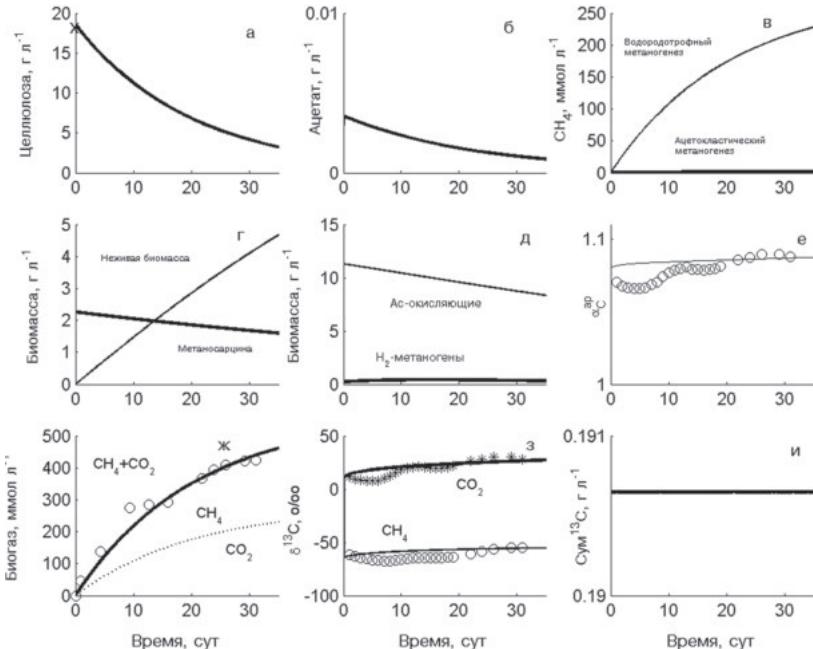


Рис. 1. Превращение целлюлозы в метан при высокой концентрации биомассы ацетат-окисляющих бактерий. Экспериментальные данные [17], кривые: математическая модель [30]

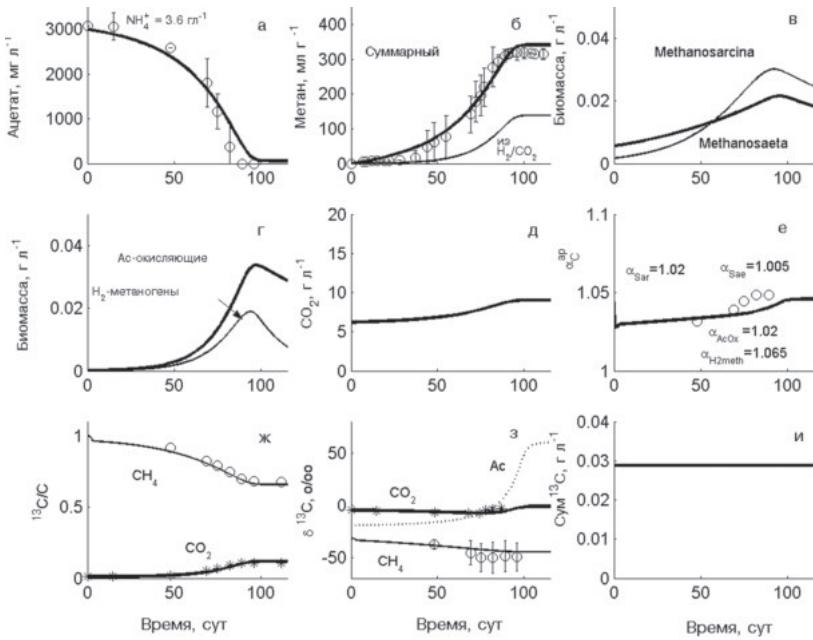


Рис. 2. Превращение меченого и природного ацетата в метан при высокой концентрации аммония 3,6 г/л в ходе 3-х параллельных экспериментов. Экспериментальные данные [11], кривые: математическая модель [30]

кую скорость роста биомассы, чем *Methanosarcina*, модель показала доминирование водородотрофного метаногенеза над ацетокластическим метаногенезом (рис. 1в). Кажущийся изотопный коэффициент фракционирования  $\alpha_{\text{C}}^{\text{ap}}$  был высоким и достиг величины 1,085 (рис. 1е), что подтверждает доминирование синтрофного окисления ацетата, спаренного с водородотрофным метаногенезом. Повидимому, это происходит вследствие высокой концентрации аммония или летучих жирных кислот. Модель показала, что при низкой концентрации биомассы ацетат-окисляющие бактерии отношение ацетокластического и водородотрофного метаногенеза составляет традиционные 70 и 30% [6].

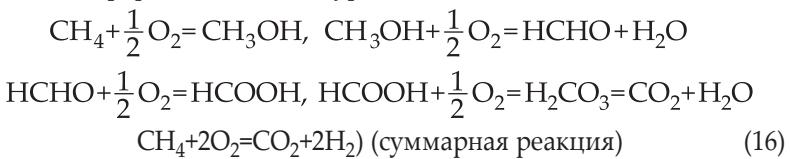
При относительно высокой концентрации аммония в системе принимают активное участие четыре группы микроорганизмов: *Methanosaetaceae*, *Methanomicrobium*, водородотрофные метаногены и ацетат-окисляющие бактерии, находящиеся в исходной затравке микроорганизмов. Поскольку при этом ацетокластические метаногены

имеют значительно меньшую скорость роста, в системе развиваются ацетат-окисляющие бактерии и водородотрофные метаногены, несмотря на их малую начальную концентрацию (рис. 2г). Метан образуется как из ацетата, так и из угольной кислоты. В итоге меченым метан становится лишь на 75% (рис. 2ж). Ацетокластические метаногены обладают невысоким коэффициентом фракционирования стабильных изотопов углерода  $\alpha_c=1,02$  (*Methanosarcinaceae*) и  $\alpha_c=1,005$  (*Methanosaetaceae*). В процессе образования метана из ацетата идёт увеличение кажущегося коэффициента фракционирования  $\alpha_c$  от 1,028 до 1,047 (рис. 2е), поскольку водородотрофные метаногены обладают большим коэффициентом фракционирования стабильных изотопов углерода  $\alpha_c=1,065$ .

Таким образом, анализируя динамику фракционирования стабильных изотопов, можно сделать выводы о химических реакциях, динамике микробной экосистемы и вкладе различных микроорганизмов в образовании метана.

### **Аэробное окисление метана и фракционирование изотопов углерода и водорода**

Количественное описание микробного окисления метана является существенным для оценки цикла метана в биосфере и понимания роли метана в глобальном потеплении [15]. Процесс аэробного окисления метана разными метан-окисляющими микроорганизмами или метанотрофами [5] может протекать по двум биохимическим путям: сериновому и рибулезо-монофосфатному (RuMP). По сериновому метаболизму скорость роста биомассы зависит от конечного продукта окисления метана  $H_2CO_3$ . Согласно химическому пути, предложенному Темплтоном и др. [25], в процессе окисления метана идёт образование промежуточных продуктов, а именно метанола, формальдегида и муравьиной кислоты:



Эти реакции описывают рибулезо-монофосфатный путь окисления метана (RuMP).

Аэробное окисление метана сопровождается сильным фракционированием стабильных изотопов углерода и водорода, приводя к обогащению  $^{13}\text{C}$  и  $^2\text{H}$  в остающемся метане. Следуя работе [29], в основе нелинейной математической модели, описывающей физический процесс растворения метана, динамику роста микроорганизмов и потребления метана лежит баланс общего углерода в системе. Для рибуллёзо-монофосфатного пути базовая модель рассматривалась в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\text{CH}_4^G}{dt} &= -TR_{\text{CH}_4} \\ \frac{d\text{CH}_4}{dt} &= +TR_{\text{CH}_4} \\ \frac{d\text{HCHO}}{dt} &= v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} - c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} \\ \frac{dB}{dt} &= Y c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} \\ \frac{d\text{O}_2^G}{dt} &= -TR_{\text{O}_2} \\ \frac{d\text{O}_2}{dt} &= -v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} - c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + TR_{\text{O}_2} \\ \frac{d\text{CO}_2^G}{dt} &= -TR_{\text{O}_2} \\ \frac{d\text{H}_2\text{CO}_3}{dt} &= (1-Y) c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + TR_{\text{CO}_2} \end{aligned} \quad (17)$$

где  $B$  – концентрация биомассы микроорганизмов,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{HCHO}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  – концентрации метана, кислорода, формальдегида и угольной кислоты, соответственно;  $v_m$  – максимальная удельная скорость ферментативного окисления растворенного метана;  $c_m$  – максимальная удельная скорость потребления формальдегида;  $cr$  – минимальная концентрация растворенного метана, ниже которой не происходит рост биомассы;  $K_{\text{CH}_4}$ ,  $K_{\text{HCHO}}$ ,  $K_{\text{H}_2\text{CO}_3}$ ,  $K_{\text{O}_2}$  – соответствующие константы полу-насыщения для концентраций метана, формальдегида, карбоновой кислоты и кислорода, соответственно;  $Y$  – экономический коэффициент (коэффициент трансформации субстрата в биомассу);

индекс G означает газообразную форму метана, кислорода и углекислого газа. Предполагалось, что концентрации метанола и муравьиной кислоты, являясь быстрыми переменными, подстраивались под текущие значения концентрации растворённого метана. К основной системе (17) были добавлены соответствующие уравнения для тяжёлых изотопов  $^{13}\text{C}$  и  $^2\text{H(D)}$ :

$$\begin{aligned}
 \frac{d^{13}\text{CH}_4^G}{dt} &= -\frac{1}{\alpha_C} \frac{^{13}\text{CH}_4^G}{\text{CH}_4^G} TR_{\text{CH}_4} \\
 \frac{d^{13}\text{CH}_4}{dt} &= \frac{1}{\alpha_C} \left( -\frac{^{13}\text{CH}_4}{\text{CH}_4^G} v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + \frac{^{13}\text{CH}_4^G}{\text{CH}_4^G} TR_{\text{CH}_4} \right) \\
 \frac{d\text{CDH}_3^G}{dt} &= -\frac{1}{\alpha_H} \frac{\text{CDH}_3^G}{\text{CH}_4^G} TR_{\text{CH}_4} \\
 \frac{d\text{CDH}_3}{dt} &= \frac{1}{\alpha_H} \times \\
 &\times \left( -\frac{\text{CDH}_3}{\text{CH}_4} v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} + \frac{\text{CDH}_3^G}{\text{CH}_4^G} TR_{\text{CH}_4} \right) \quad (18) \\
 \frac{d^{13}\text{C}B}{dt} &= \frac{1}{\alpha_C} \frac{H^{13}\text{CHO}}{\text{HCHO}} Y c_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} \\
 \frac{dH^{13}\text{CHO}}{dt} &= \frac{1}{\alpha_C} \frac{^{13}\text{CH}_4}{\text{CH}_4} \times \left( v_m B \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} - \right. \\
 &\left. - \frac{H^{13}\text{CHO}}{\text{HCHO}} c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} \right) \\
 \frac{d^{13}\text{CO}_2^G}{dt} &= -\frac{1}{\alpha_C^{H_2\text{CO}_3}} \frac{^{13}\text{CO}_2^G}{\text{CO}_2^G} TR_{\text{CO}_2} \\
 \frac{dH_2^{13}\text{CO}_3}{dt} &= \frac{1}{\alpha_C} \frac{H^{13}\text{CHO}}{\text{HCHO}} (1 - Y) c_m B \frac{\text{HCHO}}{K_{\text{HCHO}} + \text{HCHO}} \frac{\text{O}_2}{K_{\text{O}_2} + \text{O}_2} +
 \end{aligned}$$

где  $^{13}\text{CH}_4^G$ ,  $^{13}\text{CH}_4$ ,  $\text{CDH}_3^G$ ,  $\text{CDH}_3$ ,  $H^{13}\text{CHO}$ ,  $^{13}\text{CO}_2^G$ ,  $H_2^{13}\text{CO}_3$ ,  $^{13}\text{C}B$  – концентрации соответствующих переменных, содержащих «тяжё-

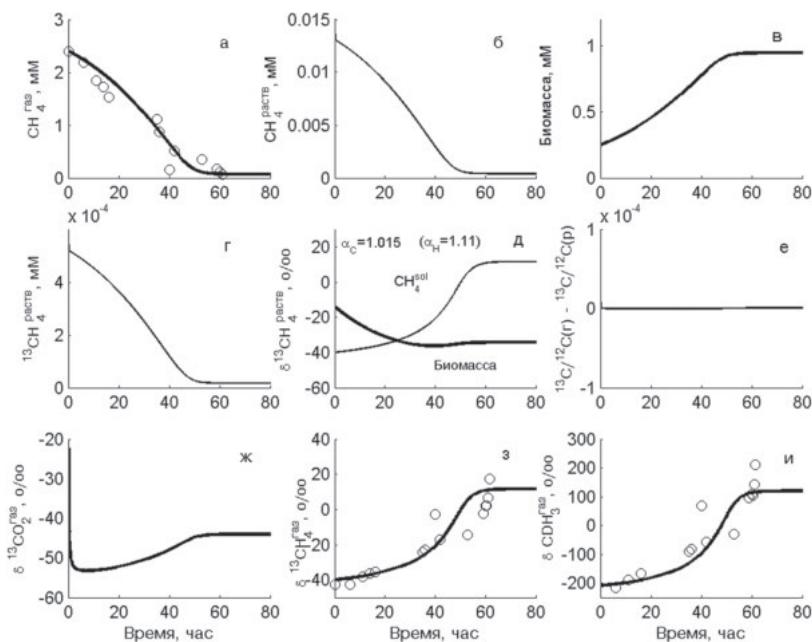


Рис. 3. Рибулезо-монофосфатный (RuMP) путь окисления метана (*Methylocaldium gracile*). Символы: эксперимент [10]; кривые: математическая модель [29]

лье» изотопы  $^{13}\text{C}$  и  $^2\text{H}$  в газовой и растворённой формах;  $\alpha_c$  и  $\alpha_H$  – коэффициенты фракционирования изотопов углерода и водорода. В системе (18) сохраняется баланс углерода  $^{13}\text{C}$  в ходе окисления метана. Для изотопов водорода оценка баланса  $^2\text{H}$  затруднена из-за обмена с изотопами воды  $\text{H}_2\text{O}$ .

В математической модели предполагалось, что отношение изотопов  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в газовой и жидкой фазах было одинаковым. Для этого при растворении «тяжёлого» метана правая часть уравнений метана в газовой фазе умножалась на коэффициенты  $1/\alpha_c$ ,  $1/\alpha_H$ , где  $\alpha_c$  и  $\alpha_H$  равны углеродному и водородному изотопным факторам фракционирования в ходе микробиологического окисления растворённого метана. Таким путём описывался процесс растворения «тяжёлого» метана с меньшей скоростью, чем «лёгкого» метана в соответствии со скоростям его микробиологического окисления.

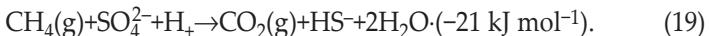
На рис. 3 представлены результаты моделирования процесса окисления метана по RuMP метаболическому пути. Предполагалась достаточно высокая начальная концентрация биомассы метанотро-

фов (рис. 3в), обеспечивающая высокую начальную скорость реакции. Дополнительно моделировался и сериновый путь окисления метана (не приводится в обзоре). В сериновом метаболизме наблюдалась задержка процесса [29], поскольку скорость роста биомассы сильно зависела от начальной концентрации биомассы и конечного продукта  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , являющегося в то же время вторым субстратом (допускалось, что  $B_0$  была значительно ниже в сериновом, чем в RuMP метаболизме). Таким образом, было обнаружено, что для серинового метаболизма рост биомассы метанотрофов лимитировал скорость окисления метана.

Если не рассматривать процесс фракционирования изотопов в ходе микробиологического окисления метана, отношения изотопов  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в газовой и жидкой фазах будут сильно отличаться, что противоречит экспериментальным данным Нокса и др. [16]. Учёт фракционирования изотопов углерода в ходе микробиологического окисления метана позволяет получить одинаковые отношения изотопов  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в газовой и жидкой фазах. Кроме того, моделирование [29], как и экспериментальные данные [10] показали, что величина факторов фракционирования  $\alpha_C$  и  $\alpha_H$  зависит как от вида метанотрофных бактерий, так и от содержания меди в растворе, влияющей на скорость ферментативных процессов. Таким образом, фракционирование изотопов углерода и водорода происходит именно в процессе микробного окисления растворенного метана.

### **Анаэробное окисление метана сульфатом и фракционирование изотопов углерода, водорода и серы**

Анаэробное окисление метана (АОМ) сульфатом играет ключевую роль в цикле углерода и серы в морских экосистемах. В донных отложениях морей вклад АОМ достигает 80–85% от общего окисления метана в морях [12], существенно ограничивая поступление метана в атмосферу. АОМ идет вблизи термодинамического равновесия, осуществляемый синтрофным консорциумом метанотрофных архей (ANME) и сульфат-редуцирующих Deltaproteobacteria (DSS):



При этом часто образуются небольшие агрегаты [4] или объёмные маты. Сравнительно недавно Милучка и др. [22] показали, что нейтральные соединения серы ( $\text{S}^0$ ) образуются в процессе восстанов-

ления сульфатов. В ходе АОМ обратимость ферментативных реакций может уменьшить общую скорость процесса [14].

Холлер и др. [13] в периодическом эксперименте определили факторы фракционирования стабильных изотопов углерода и водорода в процессе АОМ, осуществляя культуроймикроорганизмов с высокой активностью окисления, взятыми из 3-х донных отложений(HydrateRidge,NEPacificAmonMudVolcano,MediterraneanSea,NWshelf,BlackSea). Проведённое нами моделирование процесса показало [27], что изотопные факторы фракционирования  $\alpha_C$  и  $\alpha_H(\delta^{13}\text{CH}_4/\delta^{12}\text{CH}_4)$  и  $\delta\text{CDH}_2/\delta\text{CH}_4$  были равны 1,012, 1,12 (Гидраты HydrateRidge: 12°C), 1,02, 1,2 (Вулкан AmonMud: 20°C) и 1,036, 1,34 (Black Sea: 12°C), что оказалось близким к факторам фракционирования, оценённым Холлером [13] с помощью уравнения Релея (3). Такие различные значения факторов фракционирования могут зависеть от вида биомассы и обратимости реакции так же, как и от состава промежуточного продукта.

В математической модели для описания роста обобщённой биомассы микроорганизмов  $B$  используем функцию Моно с двумя субстратами (метан и сульфат):

$$\begin{aligned} \frac{d\text{CH}_4}{dt} &= -\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \\ \frac{d\text{SO}_4^{2-}}{dt} &= -\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \\ \frac{d\text{CO}_2}{dt} &= (1-Y)\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \quad (20) \\ \frac{d\text{HS}^-}{dt} &= (1-Y)\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \\ \frac{dB}{dt} &= Y\rho_m B \frac{\text{CH}_4}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \end{aligned}$$

где  $\text{CH}_4, \text{SO}_4^{2-}$  – концентрации метана и аниона сульфата;  $B$  – концентрация обобщённой биомассы, объединяющей анаэробные метанотрофные археи (ANME) и сульфат-редуцирующие (DSS) бактерии;  $\text{CO}_2$  and  $\text{SH}^-$  – концентрации диоксида углерода и аниона сероводорода, соответственно;  $\rho_m$  – максимальная удельная скорость процесса;  $K_{\text{CH}_4}$

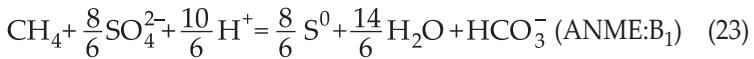
и  $K_{SO_4^{2-}}$  – 2-константы полу-насыщения по концентрации метана и сульфата;  $Y$  – экономический коэффициент. Система (20) дополняется соответствующими уравнениями для тяжёлого метана:

$$\frac{d^{13}\text{CH}_4}{dt} = \frac{^{13}\text{CH}_4}{\text{CH}_4} \frac{1}{\alpha_C} \frac{d\text{CH}_4}{dt}, \quad (21)$$

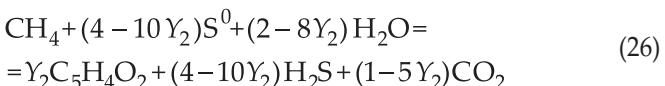
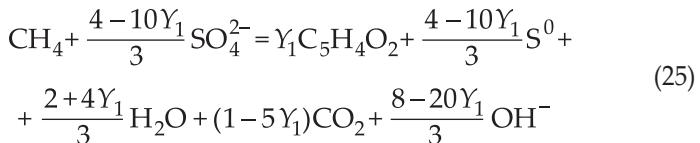
$$\frac{d \text{C}^2\text{H}^1\text{H}_3}{dt} = \frac{\text{C}^2\text{H}^1\text{H}_3}{\text{CH}_4} \frac{1}{\alpha_H} \frac{d\text{CH}_4}{dt}, \quad (22)$$

где  $^{13}\text{CH}_4$  и  $\text{C}^2\text{H}^1\text{H}_3$  – концентрации соответствующих тяжёлых фракций метана,  $\alpha_C$  и  $\alpha_H$  – коэффициенты фракционирования по углероду и водороду. Динамика анаэробного окисления метана (АОМ) показана на рис. 4. Видно, что нулевой порядок изменения  $\delta\text{CH}_4$  и  $\delta\text{CDH}_3$  обусловлен нулевым порядком скорости АОМ.

Как было указано выше, Милучка и др. [22] показали, что нейтральные соединения серы ( $S^0$ ) образуются в процессе восстановления сульфатов, а общий процесс АОМ может быть представлен синтрофными реакциями, осуществляемыми двумя группами микроорганизмов ANME и DSS. В качестве промежуточного продукта может быть ряд нейтральных соединений серы с простейшим из них  $S^0$ . В этом случае стехиометрические реакции записываются в виде:



С учётом биомассы ANME и DSS стехиометрические реакции могут быть представлены в виде:



Деснер и др. [9] провели АОМ, измеряя изотоп серы  $^{34}\text{S}$  в проточном ректоре повышенного давления с увеличенным временем пребывания биомассы из-за образования агрегатов биомассы и их осаждения. Метан находился в растворе. Для описания процесса

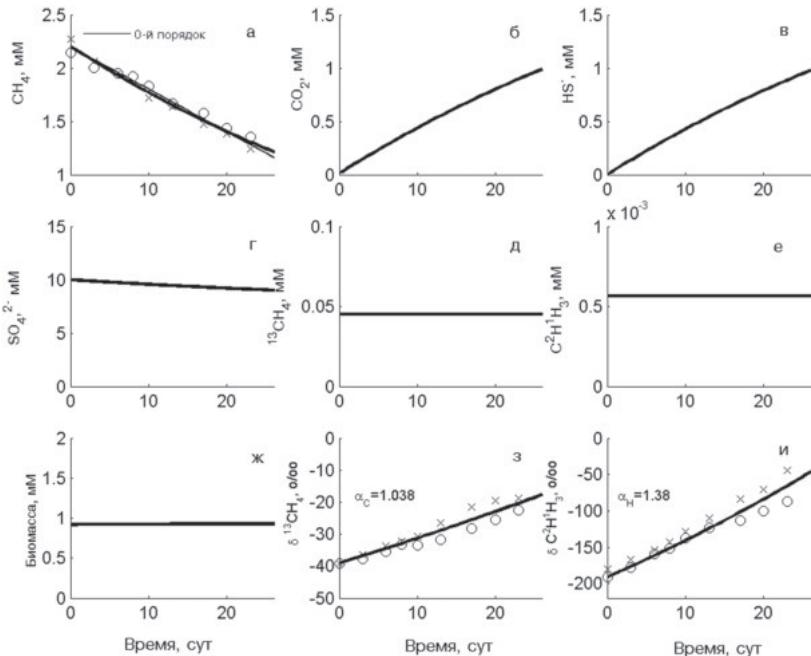


Рис. 4. Динамика анаэробного окисления метана сульфатом. Символы: периодический эксперимент [13]; кривые: математическая модель (20) с одной обобщенной биомассой [27]

введём дополнительные функции, описывающие скорость потребления метана  $R$  в ходе реакций (25) и (26):

$$R_1 = \rho_{m1} B_1 \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{\text{SO}_4^{2-}}{K_{\text{SO}_4^{2-}} + \text{SO}_4^{2-}} \quad (27)$$

$$R_2 = \rho_{m2} B_2 \frac{\text{CH}_4 - cr}{K_{\text{CH}_4} + \text{CH}_4 - cr} \frac{S^0}{K_{S^0} + S^0} \quad (28)$$

где  $S^0$  – концентрация нейтральной серы;  $B_1$  и  $B_2$  – концентрации ANME и DSS;  $\rho_{m1}$  и  $\rho_{m2}$  – максимальные удельные скорости процессов (25) и (26);  $K_{S^0}$  – константа полу-насыщения по концентрации нейтральной серы;  $cr$  – минимальная концентрация метана, ниже которой прекращается рост биомассы. Базовая математическая модель АОМ, не рассматриваящая изотопные переменные, записывается в виде:

$$\begin{aligned}
\frac{d\text{CH}_4}{dt} &= -R_1 - R_2 + \frac{1}{T} (\text{CH}_4^{\text{in}} - \text{CH}_4) \\
\frac{d\text{SO}_4^{2-}}{dt} &= -\frac{4-10Y_1}{3} R_1 + \frac{1}{T} (\text{SO}_4^{2-\text{in}} - \text{SO}_4^{2-}) \\
\frac{d\text{CO}_2}{dt} &= (1-5Y_1) R_1 + (1-5Y_2) R_2 + \frac{1}{T} (\text{CO}_2^{\text{in}} - \text{CO}_2) \\
\frac{d\text{H}_2\text{S}}{dt} &= (4-10Y_2) R_2 + \frac{1}{T} (\text{H}_2\text{S}^{\text{in}} - \text{H}_2\text{S}) \\
\frac{d\text{S}^0}{dt} &= \frac{4-10Y_1}{3} R_1 - (4-10Y_2) R_2 + \frac{1}{T} (\text{S}^0 \text{in} - \text{S}^0) \\
\frac{dB_1}{dt} &= Y_1 R_1 + \frac{1}{T} B_1^{\text{in}} - \frac{1}{T_1} B_1 \\
\frac{dB_2}{dt} &= Y_2 R_2 + \frac{1}{T} B_2^{\text{in}} - \frac{1}{T_1} B_2
\end{aligned} \tag{29}$$

где  $Y_1$  и  $Y_2$  – экономические коэффициенты для ANME и DSS;  $T$  и  $T_1$  – время пребывания растворенных реагентов и биомассы в реакторе. Допускалось, что биомасса микроорганизмов слабо вымывалась из реактора, при этом  $T_1 \gg T$ . Индекс «in» обозначал входящую концентрацию реагента. Предполагалось, что вода и гидроксил-ион присутствуют в реакторе в избытке.

Систему (29) нужно дополнить соответствующими уравнениями для тяжёлой серы  $^{34}\text{S}$ :

$$\begin{aligned}
\frac{d^{34}\text{SO}_4^{2-}}{dt} &= -\frac{^{34}\text{SO}_4^{2-}}{\text{SO}_4^{2-}} \frac{1}{\alpha_{\text{S-SO}_4^{2-}}} \frac{4-10Y_1}{3} R_1 + \frac{1}{T} (^{34}\text{SO}_4^{2-\text{in}} - ^{34}\text{SO}_4^{2-}) \\
\frac{d^{34}\text{S}^0}{dt} &= \frac{^{34}\text{SO}_4^{2-}}{\text{SO}_4^{2-}} \frac{1}{\alpha_{\text{S-SO}_4^{2-}}} \frac{4-10Y_1}{3} R_1 - \\
&- \frac{^{34}\text{S}^0}{\text{S}^0} \frac{1}{\alpha_{\text{S-S}^0}} (4-10Y_2) R_2 + \frac{1}{T} (^{34}\text{S}^0 \text{in} - ^{34}\text{S}^0) \\
\frac{d\text{H}_2^{34}\text{S}}{dt} &= \frac{\text{H}_2^{34}\text{S}}{\text{S}^0} \frac{1}{\alpha_{\text{S-S}^0}} (4-10Y_2) R_2 + \frac{1}{T} (\text{H}_2^{34}\text{S}^0 \text{in} - \text{H}_2^{34}\text{S}^0)
\end{aligned} \tag{30}$$

где  $^{34}\text{SO}_4^{2-}$ ,  $^{34}\text{S}^0$  и  $\text{H}_2^{34}\text{S}$  – концентрации соответствующих тяжелых фракций реагентов,  $\alpha_{\text{S-S}_4^{2-}}$  и  $\alpha_{\text{S-S}^0}$  – коэффициенты фракционирования изотопов серы.

Динамика системы представлена на рис. 5. Из рисунка следует, что коэффициенты фракционирования начального субстрата сульфата  $\alpha_{S-S_4^{2-}}$  и промежуточного продукта нейтральной серы  $\alpha_{S-S^0}$  могут сильно различаться.

### Выводы

Динамика фракционирования стабильных изотопов является следствием динамики химических и биологических процессов. Перераспределения стабильных изотопов позволяет уточнить метаболический путь утилизации субстрата и определить соответствующие кинетические параметры. В табл. показаны исследованные процессы и их кинетические характеристики, в том числе факторы фракционирования стабильных изотопов.

Поступление метана в атмосферу зависит как от его образования, так и его окисления. В свою очередь, аэробное и анаэробное окисление метана, идущие в водной среде, зависят не только от

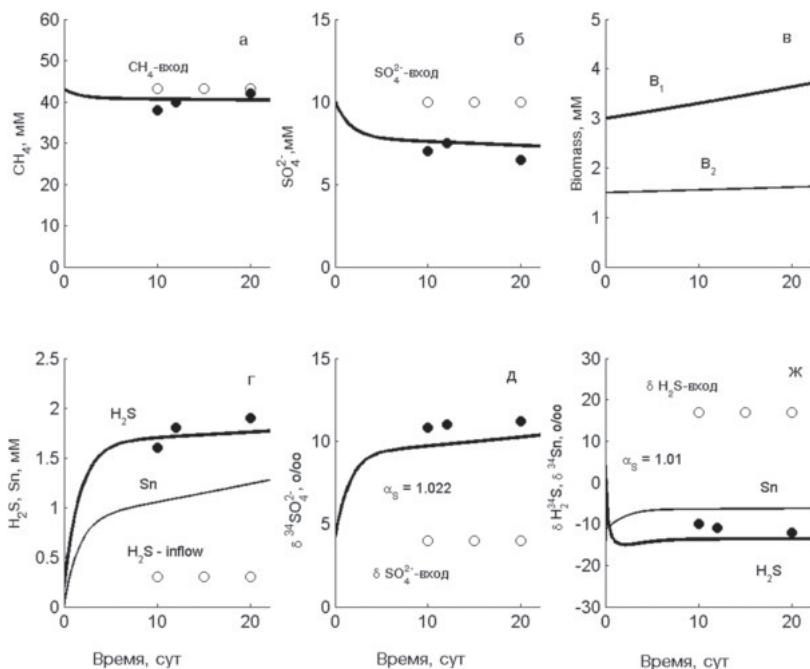


Рис. 5. Динамика анаэробного окисления метана сульфатом. Символы: проточный эксперимент [9]; кривые: математическая модель с двумя группами биомассы

**Исследуемые процессы, константы скорости и фактор фракционирования стабильных изотопов.**

Процесс	Стадия гидролиза и кислотогенеза, максимальная удельная скорость роста биомассы $\mu_m$	Фактор фракционирования изотопов	Примечания
1. Метанизация целлюлозы (рис. 1)	Гидролиз – лимитирующая общую скорость стадия $k_h=0,05 \text{ сут}^{-1}$		Идет синтрофное окисление ацетата и водородотрофный метаногенез. Величина $\alpha_C^{\text{ap}}$ постоянна и равна 1,08
2. Метанизация ацетата при высокой концентрации аммония (рис. 2)	$0,064 \text{ сут}^{-1}$ (Sarcina) $0,026 \text{ сут}^{-1}$ (Saeta) $0,04 \text{ сут}^{-1}$ (Ак-окисляющие) $2 \text{ сут}^{-1}$ ( $\text{H}_2$ -метаногены)	$\alpha_C=1,02$ $\alpha_C=1,005$ $\alpha_C=1,02$ $\alpha_C=1,065$	Ацетокластический метаногенез замещается на водородотрофный метаногенез. Величина $\alpha_C^{\text{ap}}=1,02$ увеличивается до 1,047
3. Аэробное окисление метана по рибулезо-монофосфатному пути (рис. 3)	<i>M. gracile</i> $0,10 \text{ ч}^{-1}$ *	$\alpha_C=1,0015$ $\alpha_H=1,1$	Фракционирование изотопов идет в процессе микробного окисления растворенного метана
4. Анаэробное окисление метана сульфатом в периодическом эксперименте обобщенной биомассой (рис. 4) двумя группами микроорганизмов (рис. 5)	$0,0017 \text{ сут}^{-1}$ $0,012 \text{ сут}^{-1}$ (ANME) $0,0045 \text{ сут}^{-1}$ (DSS)	$\alpha_C=1,038$ $\alpha_H=1,38$ $\alpha_S=1,022$ $\alpha_S=1,01$	Высокая концентрация биомассы и сравнительно большая концентрация метана приводят к 0-му порядку реакции окисления метана от его концентрации. Промежуточным продуктом является нейтральная сера. Фактор фракционирования изотопов серы резко отличаются для ANME и DSS

самого метана, но и от других субстратов. В различные эволюционные времена их вклад сильно отличался. Динамика стабильных изотопов позволяет оценить как метаболический путь утилизации субстрата в самой клетке, так и вклад различных групп микроорганизмов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М., Наука, 1979.
2. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М., Наука, 1973.
3. Зякун А.М. Теоретические основы изотопной масс-спектрометрии в биологии. Пущино, Фотон-век, 2010.
4. Boetius A., Ravenschlag K., Schubert C.J., Rickert D., Widdel F., Gieseke A., Amann R., Jougensen B.B., Witte U., Pfannkuche O. A marine microbial consortium apparently mediating oxidation of methane. *Nature*, 2000. V. 407. P. 623–626.
5. Bürgmann H. Encyclopedia of Geobiology. 2011. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, 575–578.
6. Conrad R. Quantification of methanogenic pathways using stable carbon isotopic signatures: a review and a proposal. *Organ. Geochem.* 2005. V. 36. P. 739–752.
7. Craig H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1957. V.12, P. 133–149.
8. Demirel B., Scherer P. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2008. V. 7. P. 173–190.
9. Deusner C., Holler T., Arnold G.L., Bernasconi S.M., Formolo M.J., Brunner B. Sulfur and oxygen isotope fractionation during sulfate reduction coupled to anaerobic oxidation of methane is dependent on methane concentration. *Earth Planet. Sci. Let.* 2014. V. 399. P. 61–73.
10. Feisthauer S., Vogt C., Modrzynski J., Szlenkier M., Krüger M., Siegert M., Richnow H.H. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2011. V. 75. P. 1173–.
11. Grossin-Debattista J. Fractionnements isotopiques ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) engendres par la methanogenes: apports pour la comprehension des processus de biodegradation lors de la digestion anaerobie. Docteur these. 2011. Universite Bordeaux-1. 346 P.
12. Hinrichs K.U., Boetius A. The anaerobic oxidation of methane: new insights in microbial ecology and biogeochemistry. In: *Ocean Margin Systems*. G. Wefer et al. (Eds.). Springer-Verlag. Berlin. 2002. P. 457–477.
13. Holler T., Wegener G., Knittel K., Boetius A., Brunner B., Kuypers M. M.M., Widdel F. (2009) Substantial  $\delta^{13}\text{CH}_4/\delta^{12}\text{CH}_4$  and D/H fractionation during anaerobic oxidation of methane by marine consortia enriched in vitro. *Env Microbiol Reports* 2009. V.1. P. 370–376.
14. Holler T., Wegener G., Niemann H., Deusner C., Ferdelman T.G., Boetius A., Brunner B., Widdel F. Carbon and sulfur back flux during anaerobic microbial oxidation of methane and coupled sulfate reduction. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2011. V. 108. P. E1484-E1490.
15. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunois M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D.R., Bruhwiler L.,

- Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E.L., Houweling S., Josse B., Fraser P.J., Krummel P.B., Lamarque J.-F., Langenfelds R.L., Le Quéré C., Naik V., O'Doherty S., Palmer P.I., Pison I., Plummer D., Poultre B., Prinn R.G., Rigby M., Ringeval B., Santini M., Schmidt M., Shindell D.T., Simpson I.J., Spahni R., Steele L. P., Strode S.A., Sudo K., Szopa S., van der Werf G.R., Voulgarakis A., van Weele M., Weiss R. F., Williams J.E., Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience* 2013. V. 6. 813–823.
16. Knox M., Quay P.D., Wilbur D.J. Kinetic isotopic fractionation during air-water gas transfer of O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>. *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 20335–20343.
17. Laukenmann S., Polag D., Heuwinkel H., Creule M., Gronauer A., Lelieveld J., Keppler F. Identification of methanogenic pathway in anaerobic digesters using stable carbon isotopes. *Eng. Life Sci.* 2010. V. 10. P. 1–6.
18. Maggi F., Riley W.J. Mathematical treatment of isotopologue and isotopomer speciation and fractionation in biochemical kinetics. *Geochim. et Cosmochim. Acta* 2010. V. 74, P. 1823–1835.
19. Mahieu K., Visscher A.D., Vanrolleghem P., Cleemput O.V. Carbon and hydrogen isotope fractionation by microbial methane oxidation: Improved determination. *Waste management* 2006. V. 26. P. 389–398.
20. Mariotti A., Germon J.C., Hubert P., Kaiser P., Letolle R., Tardieu A., Tardieu P. Experimental determination of nitrogen kinetic isotope fractionation: some principles; illustration for the denitrification and nitrification processes. *Plant and Soil* 1981. V. 62, P. 413–430.
21. MathWorks Inc. The MathWorks, Inc. Natick, Massachusetts 01760 USA: [www.matworks.com](http://www.matworks.com). (1984).
22. Milucka J., Ferdelman T.G., Polerecky L., Franzke D., Wegener G., Schmid M., Lieberwirth I., Wagner M., Widdel F., Kuypers M.M.M. Zero-valent sulphur is a key intermediate in marine methane oxidation. *Nature* 2012. V. 491. P. 541–546.
23. Rayleigh J.W.C. Theoretical consideration respecting the separation of gases by diffusion and similar processes. *Philos. Mag.* 1896. V. 42. P. 493–498.
24. Rodriguez-Escapes P., van Breukelen B.M., Vidal-Gavilan G., Soler A., Folch A. Integrating modelling of biogeochemical reactions and associated isotope fractionation at batch scale: A tool to monitor enhanced biodenitrification applications. *Chem. Geology* 2014. V. 365. P. 20–29.
25. Templeton A., Chu K.H., Ivarez-Cohen L., Conrad M.E. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2006. V. 70. P. 1739–1752.
26. van Breukelen B.M., Prommer H. Beyond the Rayleigh equation: reactive transport modeling of isotope fractionation effects to improve quantification of biodegradation. *Environ. Sci. Technol.* 2008. V. 42, P. 2457–2463.
27. Vavilin V.A. Estimating changes of isotopic fractionation based on chemical reactions and microbial dynamics during anaerobic methane oxidation: apparent zero- and first-order kinetics at high and low initial methane concentrations. *Ant. Leeuwenhoek* 2013. V. 103. P. 375–383.

28. Vavilin V.A., Rytov S.V. Nitrate denitrification with nitrite or nitrous oxide as intermediate products: stoichiometry, kinetics and dynamics of stable isotope signatures. *Chemosphere* 2015. V. 134. P. 417–426.
29. Vavilin V.A., Rytov S.V., Shim N., Vogt C. Non-linear dynamics of stable carbon and hydrogen isotope signatures based on a biological kinetic model of aerobic enzymatic methane oxidation. *IEHS* 2016. V. 52, P. 185–202.
30. Vavilin V.A., Rytov S.V. Dynamic changes of apparent fractionation factor to describe transition to syntrophic acetate oxidation during cellulose and acetate methanization. *IEHS* 2017. V. 53, 135–156.
31. Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chem. Geology* 1999. V. 161. P. 291–314.
32. Wuebbles D.J., Hayhoe K. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews* 2002. V. 57. P. 177–210.
33. Zinder S.H., Koch M. Non-aceticlastic methanogenesis from acetate: acetate oxidation by thermophilic syntrophic coculture. *Arch. Microb.* 1984. V. 38. P. 263–272.
34. Zinder S.H. In: *Methanogenesis, Ecology, Phisiology, Biochemistry and Genetics* (ed. J.G. Ferry), Chapman & Hall, New York, 1993.

# **ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИИ СУШИ И ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

## **Современное состояние и проблемы глобальной гидрологии**

*С.Г. Добровольский*

### **Введение. Понятие «глобальная гидрология»**

Если попытаться кратко определить понятие «глобальная гидрология», то это область науки, которая занимается изучением не только гидрологических объектов и процессов на суше в глобальном масштабе, но и всех основных компонентов мирового водного баланса и их изменениями во времени.

Прежде чем обратиться к современному состоянию и проблемам глобальной гидрологии, приведём некоторые пояснения, связанные с происхождением самого понятия «глобальная гидрология». Как известно, гидрология вначале включала в качестве объекта исследований воды во всех сферах Земли, в том числе в океанах и морях. Таким образом, изначально гидрология и была «глобальной», хотя уровень науки о воде в различных сферах во многом былrudimentарным. Со временем разделы науки, связанные с океанами и морями, стали отделяться от «гидрологии» (которая превращалась по существу в «гидрологию суши») и образовали область науки под названием «океанология». В последние десятилетия существования СССР отечественная океанология, пожалуй, развивалась более интенсивно, чем гидрология суши – и финансировалась в намного больших объёмах. Достаточно сказать, что в Москве, расположенной в сотнях и тысячах километров от морей и океанов, было четыре научно-исследовательских института, занимавшиеся океанологией – и до конца 1960-х гг. (до образования Института водных проблем РАН) ни одного гидрологического института. Аналогичные процессы имели место и в системе гидрологического образования: в крупнейшем вузе страны – Московском университете – в начале 1950-х гг. из кафедры гидрологии выделилась, в качестве самостоятельной единицы, мощная кафедра океанологии.

Вместе с тем, и после разделения наук «гидрология суши» испытывала необходимость в более широком поле деятельности – в спе-

цифическом изучении ряда процессов в океане, атмосфере и криосфере в глобальном масштабе. Причин такого интереса гидрологии к Мировому океану и глобальному климату было несколько. Основные из них видятся в следующем.

Происходящие в настоящее время гидрологические процессы на поверхности суши и в подповерхностных горизонтах тесно связаны с процессами в атмосфере, а те – с процессами в океане и в криосфере. Для понимания закономерностей изменений гидрологических характеристик (в первую очередь – важнейшей из них – величины речного стока) необходимо не просто «слепо доверяться» метеорологам и климатологам, но сознательно прослеживать все звенья цепи глобального гидрологического цикла.

Попытки прогнозирования состояния вод суши на отдалённую перспективу неизбежно выводят гидрологию на глобальный уровень, так как сама проблема существенно глобальна.

Наконец, изучение гидрологических процессов в отдалённом прошлом также подразумевает способность гидрологов разбираться в палео-океанических процессах и в эволюции прошлых оледенений.

К сказанному добавим, что изучение и собственно гидрологических процессов во многих случаях и по многим причинам требует глобального подхода: изучения эволюции речного стока, озёр, водохранилищ и других гидрологических объектов в глобальном масштабе.

### **Основные исследования в области глобальной гидрологии в последние десятилетия**

Результатом и характерным признаком поворота отечественной гидрологии к глобальной тематике было появление в 1960-е – 1970-е гг., менее чем за 10 лет, трёх фундаментальнейших работ: монографии Г.П. Калинина «Проблемы глобальной гидрологии» [10], книги и атласа «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» [15] и монографии Д.Я. Ратковича «Многолетние колебания речного стока» [17]. Первая и третья из перечисленных монографий носили во многом проблемный, постановочный характер, так как были связаны с чрезвычайно дискуссионными для того времени вопросами (впрочем, значительная часть этих вопросов остаётся таковыми и в наше время). Важнейшим достижением Калинина представляется

обоснование в его труде тезиса: «До последнего времени в гидрологии преобладали преимущественно региональные исследования. Обобщение материалов по земному шару сможет дать много нового о формировании режима вод суши и вместе с тем позволит существенно развить методы гидрологических расчётов и прогнозов» ([10], с. 9). В свою очередь, Ратковичем был достигнут принципиальный результат: впервые на материале около 300 створов на реках мира было показано, что межгодовые и многолетние колебания речного стока, как правило, удовлетворительно описываются малопараметрическими стационарными стохастическими моделями, не содержащими периодических составляющих или квазициклических колебаний.

Наконец, многочисленный коллектив, работавший над монографией и атласом «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» на основе огромного, для того времени, объёма информации смог, в первом приближении, оценить средние многолетние значения составляющих глобального водообмена и величин речного стока – как в глобальном масштабе, так и для конкретных регионов. Несмотря на то что после издания указанного труда прошло более 40 лет, во многом он остаётся непревзойдённым – как по тщательности оценок, так и по качеству использованных в нём данных наблюдений.

К сказанному необходимо добавить, что существенный вклад в развитие разделов по существу «глобальной» гидрологии, её современных и палео-приложений внесли труды М.И. Будыко и И.П. Герасимова [2], М.И. Львовича [14], В.И. Ферронского и В.А. Полякова [25], Р.К. Клиге [11], Л.П. Кузнецовой (Kuznetsova, [30]), В.Е. Привальского [16], К.К. Эдельштейна [18], А.М. Догановского и В.Н. Малинина [9] и ряда других исследователей. В списке литературы указаны лишь отдельные, но показательные труды этих учёных.

Вместе с тем, важная часть вопросов, поставленных отечественными классиками глобальной гидрологии, до недавнего времени оставалась нерешённой. В конце 1960-х – в 1-й половине 1970-х гг. ещё не существовали адекватные методы идентификации стохастических моделей для описания изменений гидрологических параметров во времени и в пространстве: они постепенно внедрялись в практику научных исследований лишь с середины 1970-х гг. По этой причине правильно поставленные в работах Г.П. Калинина и Д.Я. Раткови-

ча проблемы изменений гидрологических характеристик в глобальном пространственном масштабе и в климатических масштабах времени в тот период не могли быть изучены с достаточной степенью полноты.

Дальнейшее развитие глобальной гидрологии в нашей стране и за рубежом было затруднено рядом как объективных, так и субъективных причин. Одна из них была прямо названа в труде Ю.Б. и Т.А. Виноградовых «Современные проблемы гидрологии»: «Несмотря на то, что практические проблемы регулирования вод привели к рождению гидрологии, в настоящее время они тормозят её развитие» ([3], с. 304–305). Так, вовлечение десятков научно-исследовательских институтов в 1970-е – 1980-е гг. в прикладные исследования, связанные с подготовкой бессмысленных региональных проектов «европейской» и «азиатской» перебросок речного стока в бассейны соответственно Каспийского и Аральского морей, мягко говоря, не благоприятствовало увлечению таким разделом фундаментальной науки, как глобальной гидрологией. В середине 1980-х гг. была упразднена лаборатория глобального водообмена, основанная в своё время в ИВП Г.П. Калининым. Последовавший вслед за этим «угар перестройки» и общий упадок отечественной науки вследствие её катастрофического недофинансирования также не способствовал развитию фундаментальных разделов гидрологии – вынуждая научных сотрудников гоняться за большим количеством малобюджетных и краткосрочных «грантов» (мало что дававших для науки) или решая чисто прикладные задачи по заказу министерств и ведомств. Мы уже не говорим здесь о недавнем разгроме академической науки путём фактического упразднения РАН, поставившем фундаментальные научные исследования в крайне неопределенное положение. Роковую роль играет и переход на оценку труда научных сотрудников при помощи неких «рейтингов», основанных на публикациях статей в (желательно зарубежных) журналах и почти совершенно не учитывающих монографии. Таким образом, краткое – на две странички – сообщение в журнале ценится в бесконечное число раз больше, чем крупная монография из многих сотен страниц, на подготовку которой уходят многие годы. Напомним, что именно монографии ранее были сильной стороной отечественной науки,

получившей мировую известность своими крупными теоретическими обобщениями в области гидрометеорологии.

Представляется, что и за рубежом вплоть до последнего времени целенаправленным исследованиям в области глобальной гидрологии уделялось недостаточное внимание. До 1970-х гг. работы на Западе велись примерно в том же направлении, что и в СССР и были подытожены в известной монографии А. Баумgartнера и Е. Райхеля «Мировой водный баланс» [20] – аналогичной упоминавшейся отечественной монографии [15], хотя и более скромной как по объёму, так и по кругу затронутых проблем. Однако с 1980-х гг. за рубежом научная область глобальной гидрологии, как и многие другие области наук о Земле, были буквально подняты вошедшим в моду направлением, которому было дано название «Глобальные изменения» и которое было ориентировано почти исключительно на изучение предполагаемого парникового потепления и его возможных эффектов. При этом основная роль отводилась моделям климатической системы (сокращённо МОЦАО или КМОЦ), и многие науки о Земле превратились по существу в отрасли «компьютерных наук» (ComputerScience), а результаты, в какой-то мере связанные с глобальной гидрологией, появлялись зачастую в качестве лишь побочных продуктов климатических моделей – на наш взгляд, без должной увязки с данными наблюдений и, следовательно, без сколько-нибудь глубокого целенаправленного анализа. Достаточно сказать, что вплоть до недавнего времени подробный количественный анализ изменений наблюдённого речного стока в климатических масштабах времени и в подлинно глобальном масштабе просто отсутствовал. Кстати, одна из причин такого положения дел – фактическая закрытость наиболее полного глобального электронного архива по речному стоку в г. Кобленц, Германия [27]. В этом отношении гидрологам меньше повезло, чем океанологам, климатологам, гляциологам и представителям других наук о Земле: большинство электронных архивов глобальных данных в этих областях науки полностью открыты для всеобщего пользования.

Тем не менее, несмотря на перечисленные выше трудности, в настоящее время в ИВП РАН делается попытка возродить направление глобальной гидрологии: создана одна из немногих – если не единственная в мире – лаборатория с одноименным названием

(лаборатория глобальной гидрологии), работам в этом направлении придан официальный статус, они включены в планы работ Института и РАН; выходят в свет статьи и монографии соответствующего содержания, готовятся глобальные электронные базы данных, читаются лекции для аспирантов и ведутся докторские исследования. Перечислим основные монографии, подготовленные сотрудниками лаборатории глобальной гидрологии в предшествующий период и служащие основой для современных и будущих исследований. Это книги: «Аномалии глобального тепловлагообмена» [4], «Global climatic changes in water and heat transfer accumulation processes» [23], «Stochastic climate theory» [24], «Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера»» [5], «Наводнения мира» [7], «Глобальные изменения речного стока» [6].

Основные результаты, полученные сотрудниками лаборатории в рамках основных направлений глобальной гидрологии в недавнем прошлом и в настоящий период (и ставящие новые проблемы), заключаются в следующем.

### **Исследования средних характеристик влагосодержания земных сред и составляющих глобального водообмена**

В упомянутой выше фундаментальнейшей монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» на основе большого объёма информации (максимального для того времени – для середины 1970-х гг.) и в результате чрезвычайно аккуратных расчётов была, в основном, выяснена картина среднего многолетнего влагосодержания основных компонентов климатической системы и средних значениях основных составляющих глобального влагообмена. На рис. 1 представлены оценки средних объёмов влаги, содержащейся в основных компонентах глобальной системы – почерпнутые из упомянутой монографии и дополненные нами из других источников. На этом же рисунке представлена предложенная нами новая классификация компонентов глобальной (климатической) системы, учитывающая их основное качество – размерность, влияющую на многие важные свойства потоков влаги между компонентами. Несмотря на возможные значительные ошибки в оценке величин на рис. 1 (уточнение этих оценок представляет собой одну из современных проблем глобальной гидрологии), схема отражает основное – различия в порядках представленных величин. А именно, объём воды,

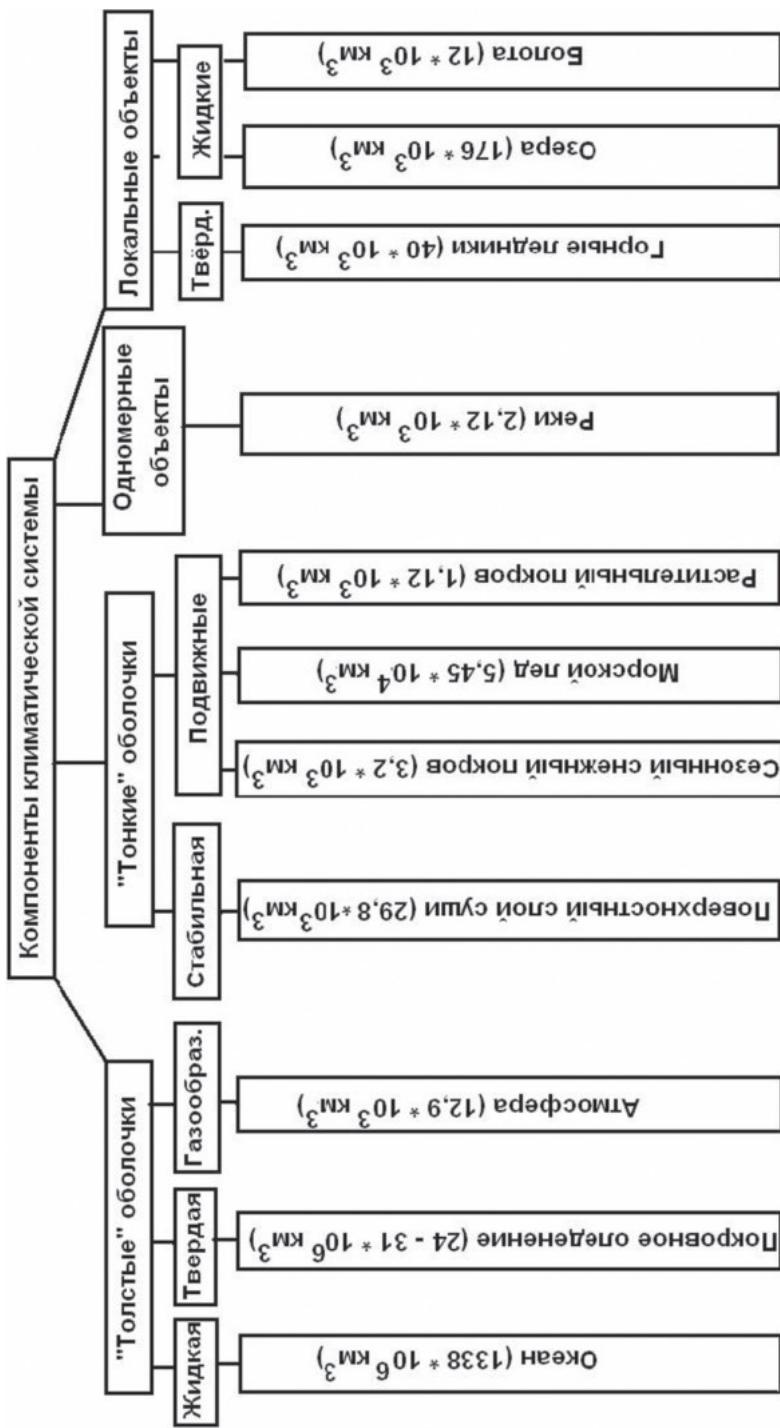


Рис. 1. Основные компоненты глобальной климатической системы и оценки объёмов воды, содержащихся в каждой из составляющих системы (по [6])

содержащейся в Мировом океане на порядки превосходит объём воды, содержащейся в других компонентах системы, за исключением покровного оледенения. Из этого обстоятельства вытекает важный вывод: потоки влаги, которыми обменивается океан с другими компонентами системы, и отклонения этих потоков от средних значений в климатическом масштабе времени – совершенно незначительны по сравнению с влагосодержанием океана. Отсюда другое важнейшее следствие: соответствующие обратные связи крайне невелики, и изменения составляющих глобального влагообмена в первом приближении не влияют на площадь поверхности океана.

Таким образом, в рассматриваемом природном механизме отсутствует так называемый реактивный эффект. Можно ожидать поэтому, что природные изменения влагосодержания океана (следовательно, и суммарного влагосодержания компонентов системы, находящихся на суше – с учётом принципа постоянства объёма влаги на Земле, обоснованного Г.П. Калининым) описываются моделью случайного блуждания – в дискретном случае моделью дискретного винеровского процесса. Добавим к этому, что по сходным причинам можно ожидать, что и естественные изменения глобальной температуры описываются аналогичной моделью.

Сложнее обстоит дело с оценками средних многолетних величин составляющих глобального водообмена. Если величины на рис. 1 могут содержать значительные ошибки, но сильно различаются по порядкам, то порядки средних величин глобальных потоков влаги сопоставимы, и ошибки оценок в данном случае чрезвычайно существенны.

Для оценки средних значений глобальных потоков влаги воспользуемся результатами реанализа, полученными в рамках выполнения проектов «20Century» и NCEP/NCAR [19, 31], как и результатами обобщения данных прямых наблюдений в рамках проектов GPCP [26], CMAP ENCH [22]<sup>1</sup>, и сравним их с оценками из издания [15]. В табл. 1 приведены результаты, полученные в рамках указанных проектов, осреднённые за перекрывающийся всеми ими период времени: 1979–2012 гг. Качество этих оценок будет анализироваться ниже, отметим здесь лишь тот факт, что 1979 г., как общее начало рядов оценённых

1 Средние величины потоков влаги по данным реанализа, были получены В.П. Юшковым с использованием «масок» океана и суши.

Таблица 1

**Средние величины глобальных потоков влаги, по данным издания [15] за период, предшествовавший началу 1970-х гг., и по данным современных проектов за период 1979–2012 гг. Все величины – в мм/сут.**

Параметр	Мир.в.б.	20 Cen.	NCEP/ NCAR	GPCP	CMAP
Испарение с океана	3,836	3,837	3,333	—	—
Осадки над океаном	3,479	3,377	2,969	2,879	2,966
Эфф. испарение, океан	0,357	0,460	0,362	—	—
Осадки над сушей	2,192	2,395	2,290	2,174	1,919
Эвапотрансп., суши	1,329	1,609	1,836	—	—
Эфф. осадки, суши	0,863	0,786	0,456	—	—

потоков фигурирует не случайно: именно с этого года начали стабильно поступать данные спутниковых наблюдений, учитываемые в результатах реанализа и предположительно делающих эти результаты более достоверными.

Как видно из таблицы, из числа наиболее современных проектов только два («20Century» и «NCEP/NCAR») дают оценки всех перечисленных составляющих мирового водного баланса; в рамках проектов «GPCP» и «CMAP enhanced») оценивались только осадки над сушей и океаном. Вследствие этого приведём сравнение лишь для результатов первых двух проектов – хотя читатели сами могут оценить результаты остальных двух.

Обратимся прежде всего к параметру, наилуче интересующему гидрологов – «эффективным осадкам» над сушей, являющимися по существу оценкой так называемого климатического стока – разности между осадками и эвапотранспирацией, которая и формирует речной сток. Непосредственно наблюдённые данные по стоку, по нашим оценкам, дают для периода 1917–2004 гг. величину глобально суммированного речного стока  $47 \cdot 10^3 \text{ км}^3/\text{год}$  [6]. В издании [15], поданным до начала 1970-х гг., приводятся цифры от 45 до 47 тыс.  $\text{км}^3/\text{год}$ . Оценка глобального «климатического стока» в проекте «20 Century», будучи пересчитанной в объёмы стока в год, даёт величину  $43 \cdot 10^3 \text{ км}^3/\text{год}$  – сравнительно близкую к нашим оценкам и оценкам из [15]: разница составляет от 4 до 9% и не превышает расхождений между двумя различными оценками в монографии 1974 г. В то же время, расхождение между наблюдёнными данными по глобальному стоку

и оценкой проекта «NCAR» чрезвычайно велика и составляет от 44 до 47% (явно больше ошибок оценок наблюдённого стока): пересчёт оценки NCAR в объёмные единицы в год даёт величину лишь  $25 \cdot 10^3$  км<sup>3</sup>/год.

Что касается составляющих глобального водообмена в целом, то оценки проекта «20 Century» в большинстве случаев ближе к оценкам из [15], чем оценки «NCEP/NCAR»: кроме упомянутых выше оценок речного стока, это также оценки испарения с поверхности океана, осадков над океаном и эвапотранспирации с поверхности суши. Практическое совпадение оценок «20 Century» и [15] для испарения с поверхности океана (3,837 и 3,836 мм/сут.) может быть случайностью. Однакосуществует подозрение, что авторы проекта «20 Century» калибровали трудно оцениваемые коэффициенты вертикального обмена у границы «атмосфера-подстилающая поверхность» таким образом, чтобы основной управляющий параметр – средняя величина испарения с поверхности океана – совпал с величиной из [15]. Напомним, что работами по вычислению испарения с поверхности Земли в проекте [15] руководил ведущий к тому времени учёный мира, занимавшийся этим вопросом, – М.И. Будыко, обладавший огромным опытом, знаниями и интуицией.

Из сказанного следует, что оценивание средних значений влагосодержания основных компонентов глобальной системы и, в особенности, потоков влаги между ними, в области которого имеется прогресс, по-прежнему представляет собой проблему глобальной гидрологии, причём – одну из основных и трудно решаемых проблем.

### **Изучение закономерностей изменений глобальных потоков влаги в климатических масштабах времени**

Если оценка средних многолетних величин составляющих глобального водообмена представляет значительные трудности из-за сложности увязки многолетних балансов тепла и влаги на границах сред, то ряды отклонений от указанных средних значений представляются рассчитанными более надёжно – в особенности, начиная с конца 1970-х гг., когда стали доступны спутниковые наблюдения. На рис. 2 показаны рассчитанные нами, с использованием данных реанализа проекта «20 Century», изменения месячных величин основных потоков влаги в глобальном гидрологическом цикле за 20 лет – с 1993

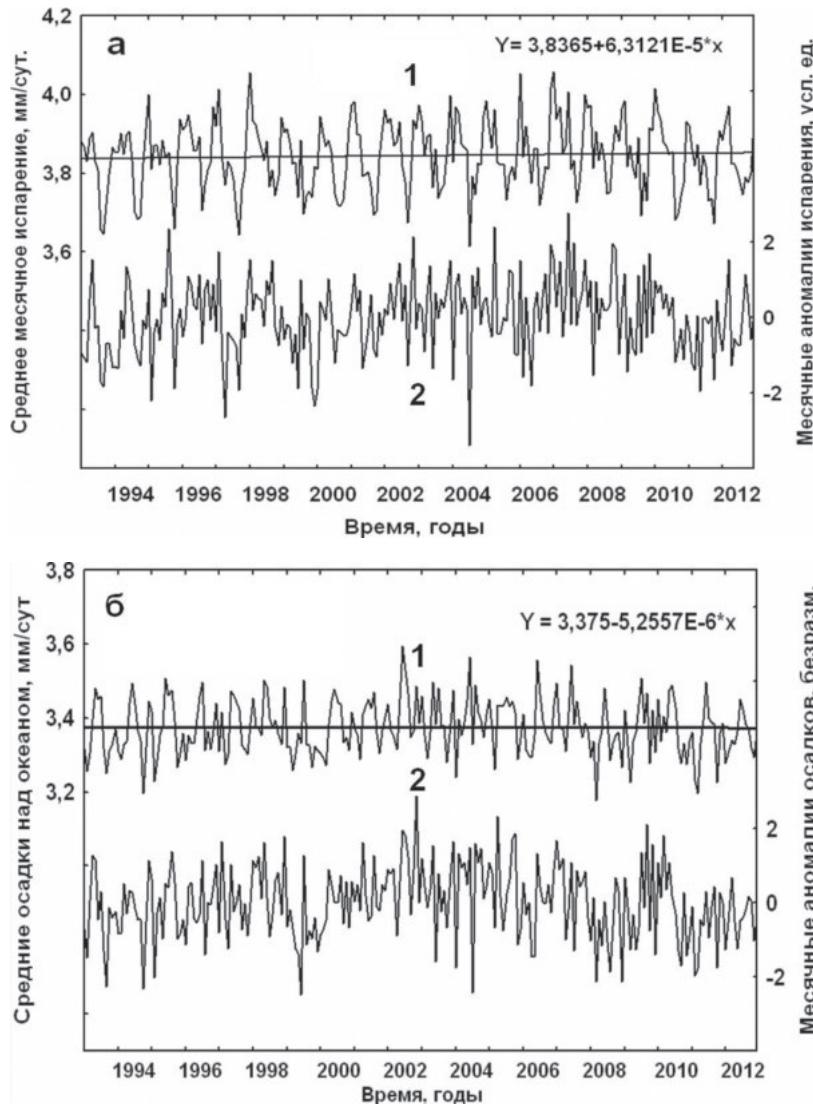
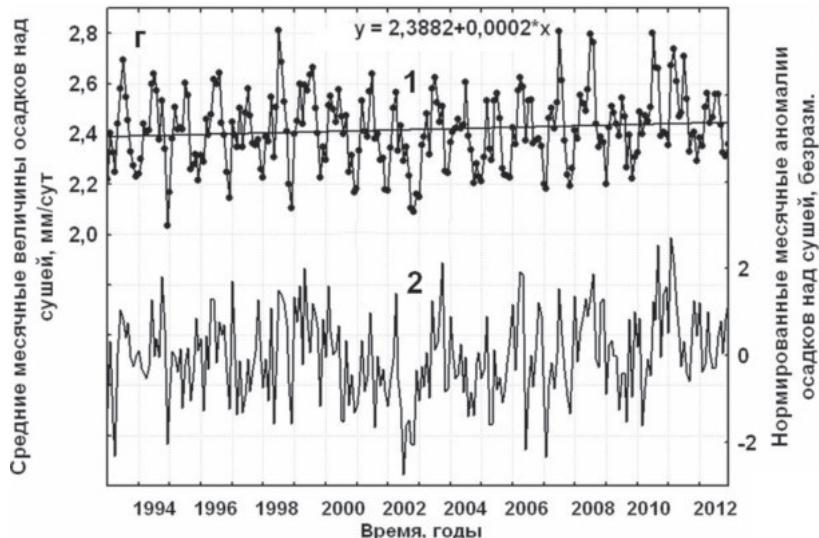
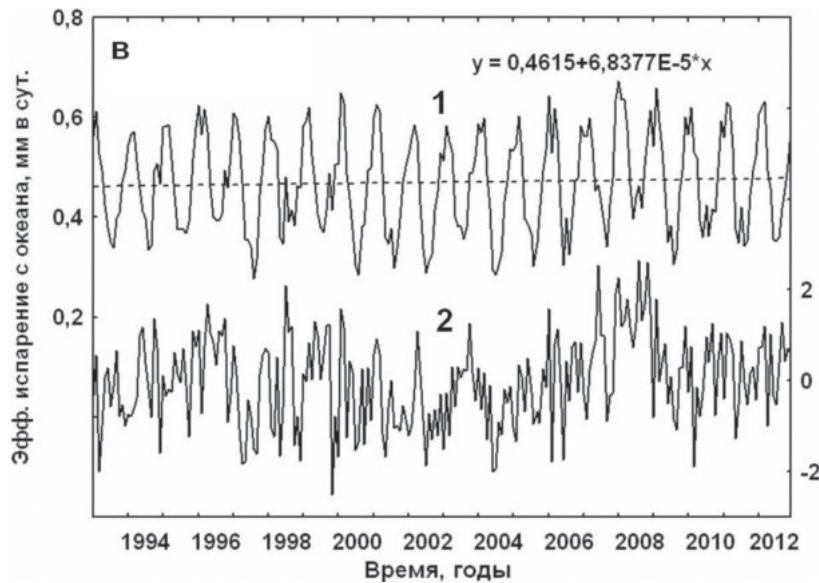
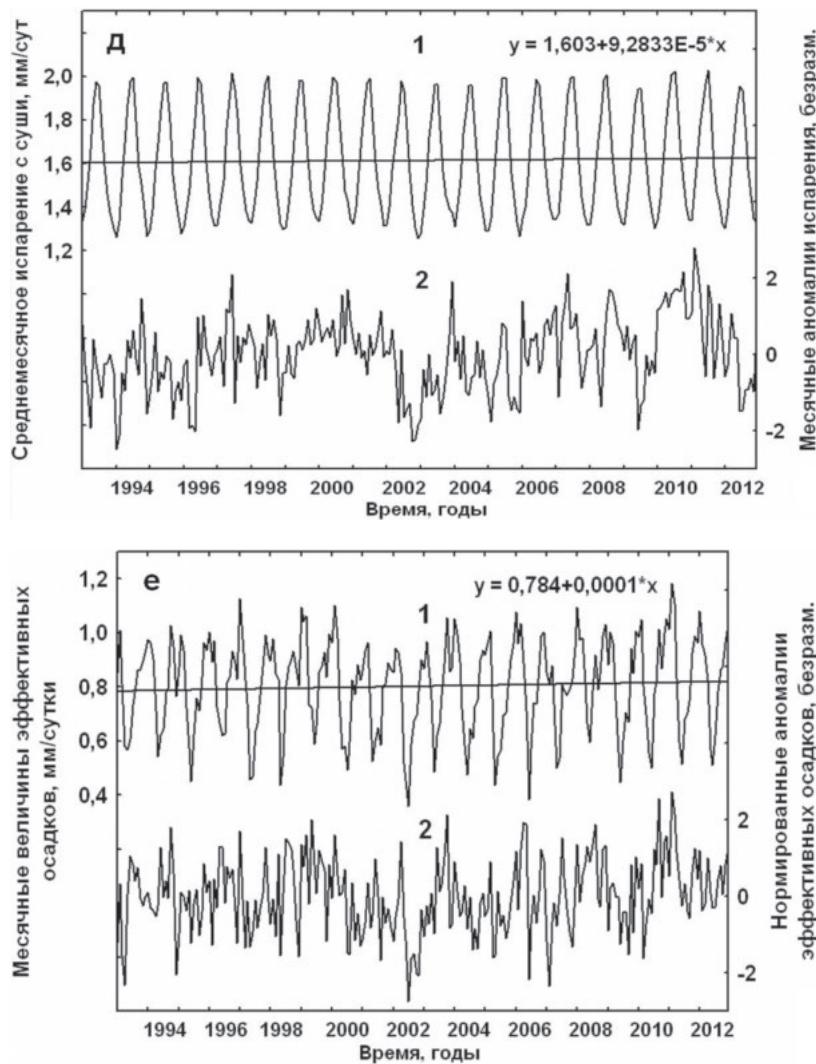


Рис. 2. Изменения во времени испарения с поверхности океана (а), осадков над океаном (б), горизонтального влагопереноса в атмосфере с океана на суши – в терминах «эффективного испарения» с поверхности океана (в), осадков над сушей (г), испарения (эвапотранспирации) с поверхности суши (д), «эффективных осадков» (разности «осадки минус испарение») над сушей (е). 1 – месячные величины (левые шкалы), 2 – аномалии месячных величин – с вычитанием среднего сезонного хода и нормированием на средний сезонный ход стандартов (правые шкалы). Рассчитано по данным реанализа проекта «20 Century» [19]



по 2012 гг. Характеристики, отображённые на рис. 2, это: среднее испарение с поверхности океана; осадки над океаном; «эффективное испарение» с поверхности океана (испарение минус осадки), являющееся по существу оценкой горизонтального влагопереноса в атмос-



фере с океана на сушу; осадки над свободной ото льда сушей; испарение (эвапотранспирация) с поверхности свободной ото льда суши; «эффективные осадки» над свободной ото льда сушей (осадки минус испарение).

Напомним, что рассматриваемый, «для круглого счёта» 20-летний, период характеризовался значительным ростом концентрации парниковых газов в атмосфере и общим ростом глобальной темп-

ратуры. Изучение рядов на рис. 2 представляет значительный интерес прежде всего с точки зрения того, какова реакция процессов глобального водообмена на глобальный «парниковый» и температурный сигналы. Очевидно, что если такого рода сигналы проявляются в ходе гидрологических процессов, то в первую очередь они должны быть значимыми при глобальном осреднении, сглаживающем региональные и многие другие случайные пульсации. Также, чрезвычайно важно исследовать детальную – месяц от месяца и год от года – структуру изменений составляющих глобального водообмена. Это позволит проверить, в отношении глобального гидрологического цикла, справедливость единственной существующей на настоящий момент теории естественных изменений климата – теории стохастических климатических моделей К. Хассельманна [28].

На рис. 2 в верхних частях (рис. 1) – исходные ряды, в нижних частях (рис. 2) – ряды в месячных аномалиях, то есть, с вычитанием среднего многолетнего сезонного хода и с последующим делением на средние многолетние стандарты соответствующего календарного месяца. Кроме того, на верхних графиках обозначены линейные аппроксимации, полученные методом пространственно-взвешенных наименьших средних квадратов, рядом приведены соответствующие уравнения.

Обращают на себя внимание очень малые, статистически незначимые изменения составляющих глобального влагооборота за рассматриваемый период. Коэффициенты уравнений на рис. 2 свидетельствуют о том, что за 20 лет – за время интенсивного роста концентраций парниковых газов в атмосфере и заметного повышения глобальной температуры – глобальные потоки влаги изменились на ничтожно малые величины. А именно, от +0,15 мм в месяц для ряда осадков над сушей до -0,04 мм в месяц для осадков над океаном, то есть, от 0,0004 до 0,0021 средних значений соответствующих величин.

Анализ структуры рядов аномалий глобальных потоков влаги (рис. 2) при помощи методов, предложенных нами в [6] также свидетельствует о стационарности рядов по математическому ожиданию. Что касается стохастической структуры рядов месячных аномалий, то изменения аномалий испарения с поверхности океана, осадков над океаном, влагопереноса в атмосфере с океана на сушу удовлетворительно описываются моделями реализаций гауссовских белых

шумов. На этом фоне выделяются ряды аномалий осадков над сушей и испарения (эвапотранспирации) с поверхности суши: они описываются реализациями процессов авторегрессии первого порядка с коэффициентом соответственно 0,34 и 0,53. Однако, анома-



Рис. 3. Расположение использованных в исследовании створов – из созданной автором, на основе 5 международных архивов, базы данных по стоку. Серым цветом обозначены регионы, информация по которым практически отсутствует: в основном, территории пустынь тропической и субтропической зон и «ледяные пустыни» крайнего севера Евразии и Северной Америки

лии разности указанных двух рядов – аномалии «эффективных осадков», которые и формируют речной сток, – вновь, как и первые звенья цепи глобального гидрологического цикла, описываются моделью реализации белого шума. Таким образом, эвапотранспирация играет как бы «отбеливающую роль», превращая красношумный спектр аномалий осадков над сушей в белошумный спектр эффективных осадков. Такая же закономерность была выявлена автором для локальных осадков, эвапотранспирации и эффективных осадков – на материале наблюдений на воднобалансовых станциях в различных природных зонах ЕТР – от тундры до засушливых степей Приазовья [23]. Наконец, следует отметить, что структура ряда годовых эффективных осадков (зачастую называемых также «климатическим речным стоком») за рассматриваемый период аналогична выявленной структуре месячных аномалий эффективных осадков и соответствует белому шуму. Наконец, забегая вперед, следует отметить, что такую же структуру имеет и большинство проанализированы автором рядов годового стока неозерных незарегулированных рек (см. раздел об изменениях речного стока).

Таким образом, из описанного выше анализа вытекают два важных вывода. Прежде всего, становится очевидным, что «парниковый» сигнал пока не отражается статистически значимо в изменениях глобального гидрологического цикла. Второе важное следствие расчётов: они полностью подтверждают теорию естественных изменений климата Хассельманна [28] и основную гипотезу этой теории: белошумность так называемого «погодного возбуждения» – случайного воздействия на подстилающую поверхность со стороны атмосферы в промежуточном и климатическом масштабах частот и периодов. Вместе с тем, указанные выводы нуждаются в дальнейшей проверке и в подтверждении на материале более совершенных реконструкций составляющих глобального водообмена.

### **Глобальные изменения речного стока**

Основной интерес при изучении глобальных гидрологических процессов представляет анализ изменений в глобальном масштабе речного стока – главного источника пресной воды на Земле. Как было отмечено выше, первая попытка такого рода анализа была предпринята в монографии Ратковича «Многолетние колебания

Таблица 2

**Показатели нестационарности многолетних рядов годового, максимального и минимального стока для рек всех типов**

Тип реки	Показатель	Годовой	Максим.	Миним.
Все типы	ПНО	+6,0%	+8,4%	+21,4%
	ПН+	+3,6%	+2,5%	+20,2%
	ПН-	+2,4%	+5,9%	+1,2%
Неозёрные незарегулированные	ПНО	+3,6%	+3,8%	+17,3%
	ПН+	+3,3%	+1,8%	+17,2%
	ПН-	+0,3%	+2,0%	+0,1%
Озёрные	ПНО	+11,0%	+18,6%	+22,7%
	ПН+	+7,1%	+7,7%	+21,5%
	ПН-	+3,9%	+10,9%	+0,7%
Ледникового питания	ПНО	+9,8%	+6,1%	+29,6%
	ПН+	-2,5%	-2,5%	+16,7%
	ПН-	+12,3%	+8,6%	+12,9%
Зарегулированные	ПНО	+6,4%	+9,6%	+24,5%
	ПН+	+3,1%	+1,9%	+23,0%
	ПН-	+3,3%	+7,7%	+1,5%

речного стока» [17]. Автором настоящей статьи аналогичное исследование было проведено на новом уровне: с использованием на порядок большего объёма информации о стоке (около 9000 многолетних рядов годового, максимального и минимального стока примерно в 3000 створах на всех обитаемых материках, рис. 3), применяя новые – специально разработанные автором для этой цели – методы и формулы оценки статистических и стохастических параметров многолетних колебаний стока [6], с использованием современных ГИС, с учётом современных теорий изменений климата.

Вкратце результаты исследования заключаются в следующем. Кардинальным является вопрос о стационарности/нестационарности изменений стока в масштабе времени порядка десятков лет. В первом случае – стационарности – применима корреляционная теория случайных функций и ее многие важные приложения.

В табл. 2 показаны рассчитанные при помощи предложенной автором методики [6] процентные доли нестационарных, по математическому ожиданию (среднему значению), различных видов стока рек различных типов питания. Аббревиатура ПНО означает общий процент нестационарных рядов, ПН+ – процент нестацио-

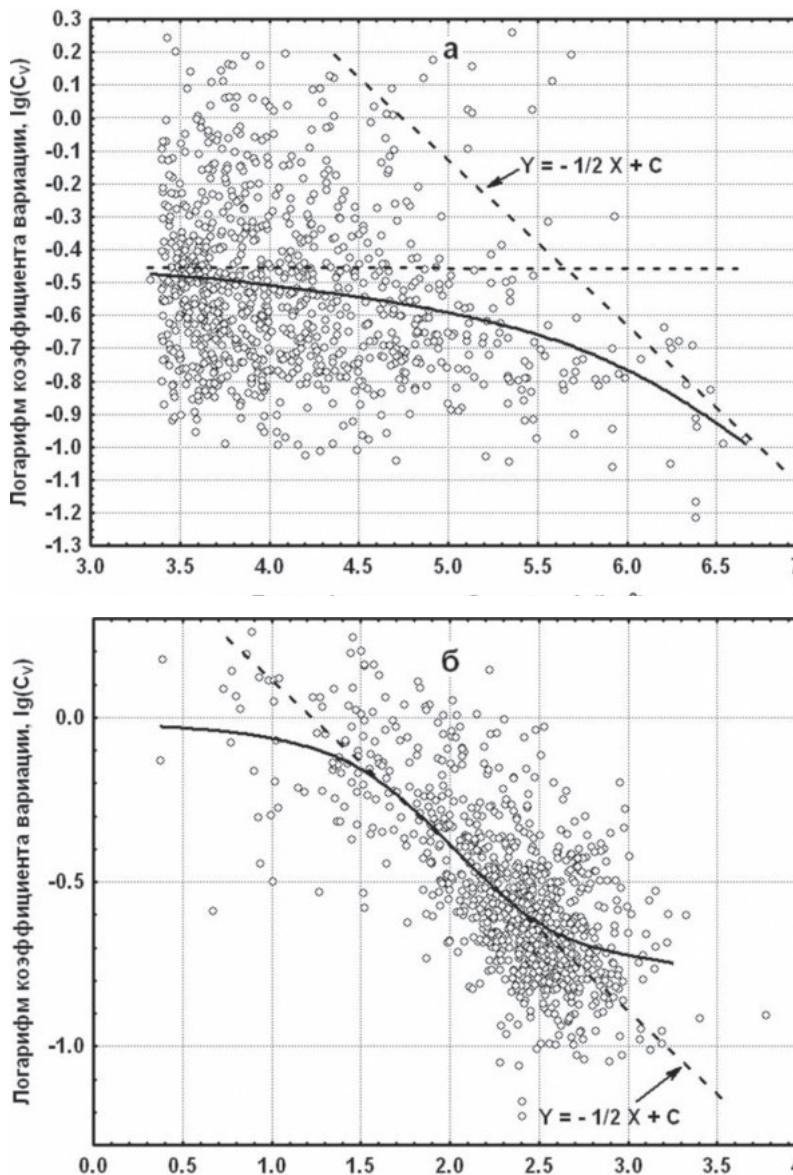


Рис. 4. Зависимости, в билогарифмических шкалах, коэффициента вариации годового стока от площади бассейна (а) и годового слоя стока (б). Неозёрные реки с ненарушенным режимом стока. Сплошные кривые – аппроксимации методом пространственно-взвешенных наименьших средних квадратов.

нарных рядов с увеличением среднего значения, ПН – с уменьшением среднего значения. Таблица показывает, что в среднем реки всех типов, а также реки основного, наиболее часто встречающегося типа – равнинные неозёрные незарегулированные – демонстрируют лишь незначительную долю нестационарных рядов годовых величин стока (не превосходящую ошибки метода). Доля нестационарных рядов годового стока других типов рек, а также рядов минимального стока всех типов рек более значительна, однако и в последнем случае, для основного типа рек, не превышает  $1/6$  всех рядов. Необходимо отметить, что использованная методика предусматривает сравнительно «жёсткий» критерий нестационарности; методические проблемы оценки степени стационарности нуждаются в дальнейшем изучении.

Важное значение имеет изучение зависимостей такого ключевого параметра изменений стока, как коэффициента вариации,  $C_V$  от морфологических характеристик водосборных бассейнов. На рис. 4 показаны зависимости  $C_V$  годового стока рек основного типа от площадей водосбора и среднего слоя годового стока.

Рисунок демонстрирует фундаментальный закон «степени минус одна вторая» зависимости от площадей бассейнов в диапазоне их больших значений и от годового слоя стока в диапазоне наиболее распространённых значений – от примерно 30 до 300 мм в год.

Другой важный итог изучения стока в глобальном масштабе – вывод о преобладающем типе стохастических моделей для описания многолетних колебаний расходов. Начиная с первых работ в этой области С.Н.Крицкого и М.Ф.Менкеля (см. обзор в [13]) считалось, что преобладающую, чуть ли не универсальную роль при описании многолетних рядов годовых значений речного стока играют так называемые простые марковские цепи (по существу, процессы автoregressии первого порядка или «марковские процессы первого порядка»). Причиной этого был естественный факт неравенства нулю выборочных значений коррелированности стока смежных лет. Детальный анализ большого числа длинных рядов годового стока из нашего архива при помощи аккуратных оценок статистических и стохастических параметров показал, тем не менее, что реальная картина существенно отличается от общепринятых представлений.

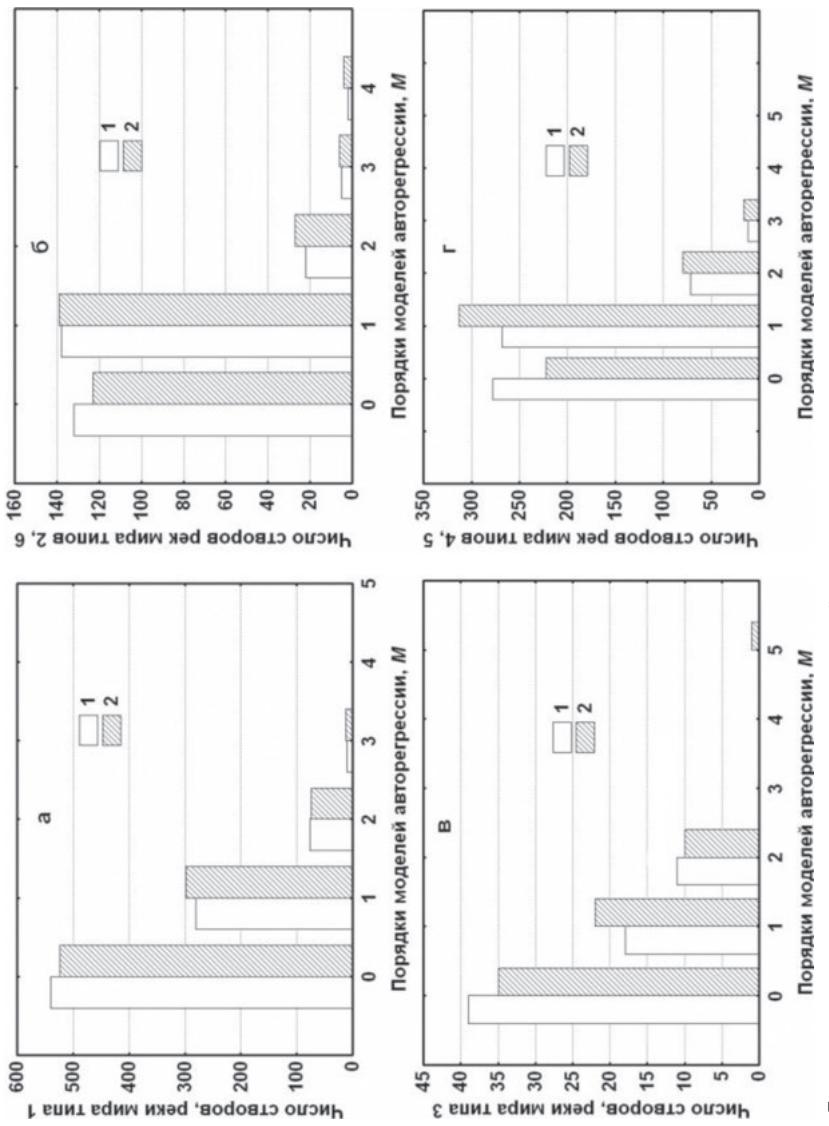


Рис. 5. Гистограммы порядков авторегрессионных моделей стока рек годового стока мира. *a* – реки основного типа – неозёрные незарегулированные, смешанного типа питания; *b* – озёрные реки; *c* – реки ледникового питания; *d* – зарегулированные реки. 1 – исходные ряды; 2 – ряды, пересчитанные в ряды выборочных значений гауссовых величин.

На рис. 5 представлены распределения стохастических (авторегрессионных) моделей рядов годовых величин стока четырёх групп рек. Графики показывают, что для основного типа рек и водосборов – неозёрных незарегулированных дождевого или смешанного снегового-дождевого питания – процент моделей нулевого порядка (реализаций белых шумов) не только превосходит процент моделей первого порядка («простых марковских цепей»), но и превосходит процент моделей всех порядков больше нулевого, вместе взятых. Для рек озёрных и рек, вытекающих из искусственных озёр – водохранилищ, – доля моделей первого порядка лишь ненамного превосходит долю моделей нулевого порядка. Заметим также, что на эту картину не влияет принципиально факт асимметричности плотности вероятности стока.

В [6] приведены аналогичные результаты для максимального и минимального стока, а также отдельно – для каждого из материков и для каждого из 23 важнейших речных бассейнов мира. Вкратце укажем, что в рядах максимального стока для всех генетических типов водосборов абсолютно преобладающую роль играют модели белого шума, в рядах минимального стока со всех типов водосборов преобладают (хотя и не столь значительно) модели первого порядка.

Отметим также другие, не описанные ранее интересные результаты, полученные нами при анализе большого числа стоковых рядов: явление «бифуркации» порядков моделей максимального и минимального стока при переходе от малых и/или засушливых водосборов к большим по площади/увлажненным водосборам; наличие максимумов коррелированности стока смежных лет на определённых значениях среднего годового слоя стока; наличие аномальных, в отношении стохастической структуры стоковых рядов, регионов – прежде всего Приленского плато и бассейна Северной Двины и др.

#### **Анализ параметров экстремальных гидрологических явлений – наводнений и засух – в глобальном масштабе**

В лаборатории глобальной гидрологии ИВП РАН, по-видимому впервые, создана объединённая электронная база данных по наводнениям и засухам мира: использованы данные по 1900 наводнениям за 1998–2015 гг. [29] и по 1700 локациям засух за 1900–2015 гг. При этом мы

пользовались следующим определением наводнения/засухи, соответствующим логике определения из [1]: «временное увеличение/уменьшение увлажнённости территорий, приводящее к материальным и/или социальным (гуманитарным) ущербам». По материалам исследований опубликована первая, в отечественной и мировой

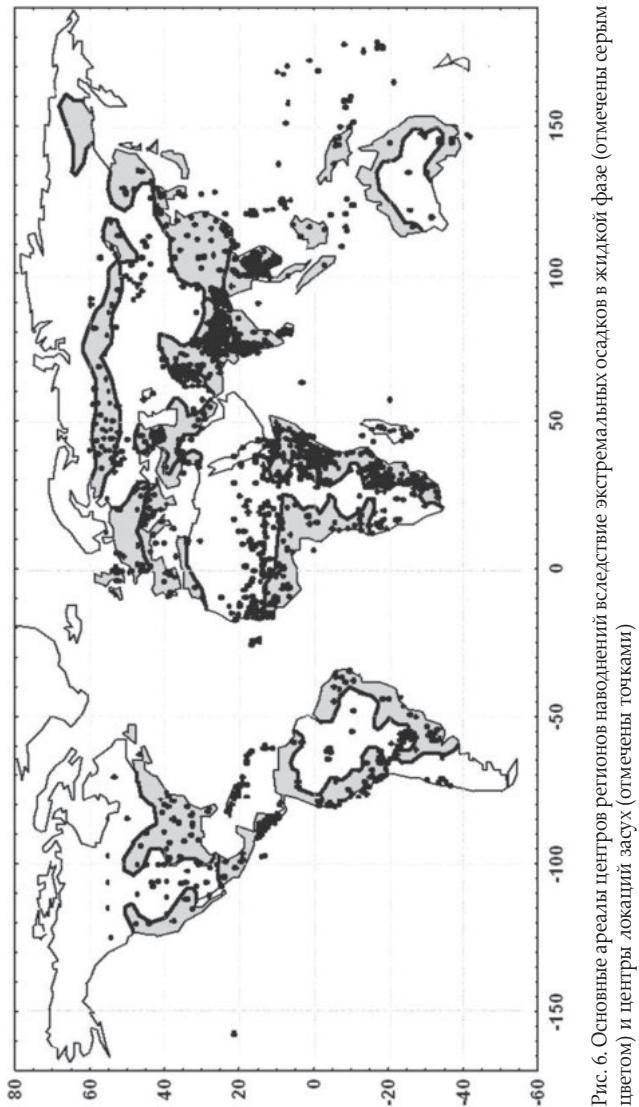


Рис. 6. Основные ареалы центров регионов наводнений вследствие экстремальных осадков в жилкой фазе (отмечены серым цветом) и центры локаций засух (отмечены точками)

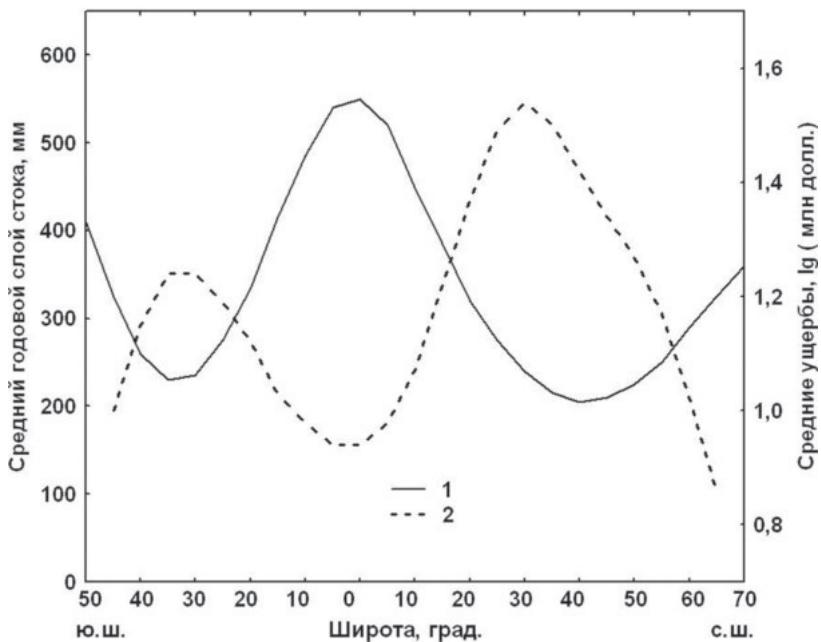


Рис. 7. Меридиональные профили осредненных по широтам средних годовых слоев стока (1, левая шкала) и средних ущербов от наводнений всех генетических типов (2, правая шкала)

литературе, монография [7], в которой был дан количественный анализ параметров наводнений в глобальном масштабе. В лаборатории готовится аналогичная монография по засухам мира.

Результаты исследований экстремальных гидрологических ситуаций в глобальном масштабе были во многом неожиданными. Так, оказалось, что между двумя, казалось бы диаметрально противоположными, типами экстремальных гидрологических ситуаций существуют определённые черты сходства. Прежде всего, это относится к географическому положению основных регионов наводнений и засух. На рис. 6 центры локаций засух наложены на контуры основных ареалов наводнений «ливневого типа» (вследствие аномальных осадков в жидкой фазе) – преобладающих как по числу, так и по вызванным ими ущербам и в РФ, и в мире. Рисунок показывает, что за исключением южной части Сахары и Среднего Запада США (и, естественно, Колымского ареала наводнений) ареалы наводнений указанного типа и ареалы засух, в основном, сходны. Резуль-

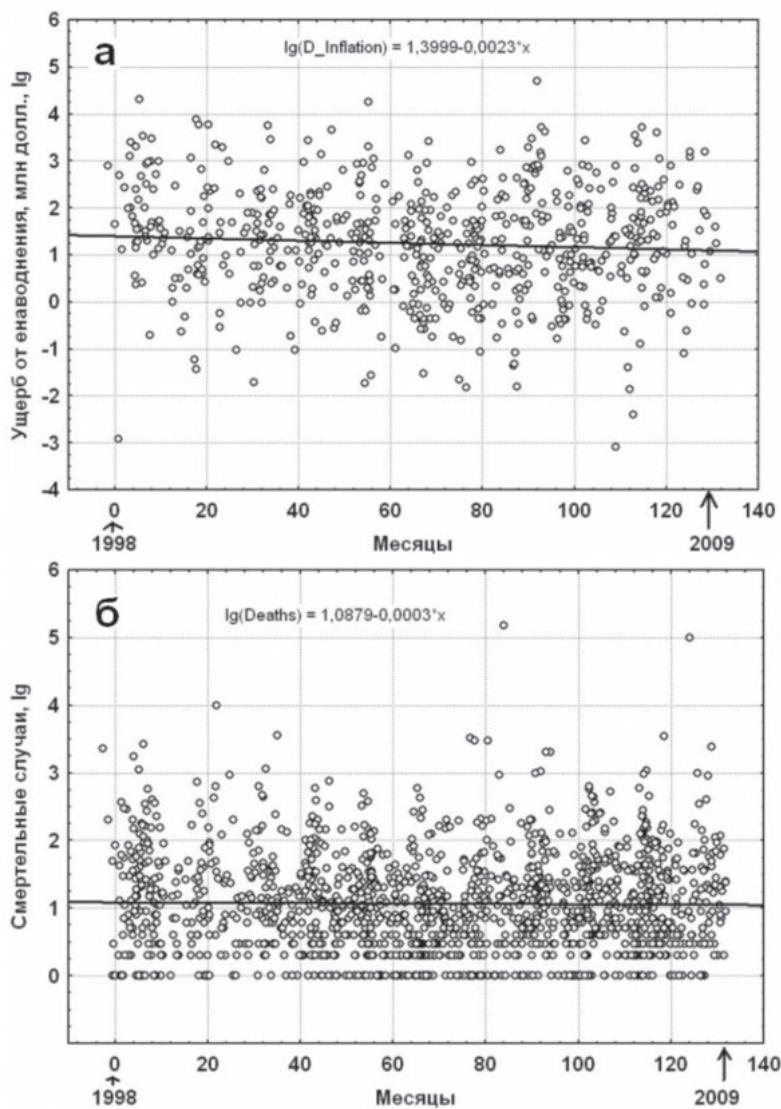


Рис. 8. Изменения во времени ущербов от наводнений мира всех типов с учётом инфляции (а) и числа смертельных случаев (б). Сплошные линии – линейные аппроксимации соответствующие уравнения представлены в верхней части рисунков

татом этого является и сходный тип распределения по широтам ущербов от двух типов экстремальных ситуаций. Напротив, среднее распределение по широтам ущербов от наводнений парадоксальным образом находится почти в противофазе с распределением по широтам основного параметра увлажненности суши – слоёв годового стока (рис. 7).

Указанные результаты являются одним из свидетельств того, что и наводнения, и засухи являются не только – может быть, не столько – природными, сколько социально-экономическими явлениями: они наблюдаются в основном в зонах с наибольшей плотностью населения и/или в наиболее экономически развитых регионах мира.

Другой неожиданный результат исследования – характер изменений во времени «природных» параметров наводнений и засух и характеристик социально-экономических ущербов от этих катастроф. Чрезвычайно широко распространено мнение о том, что по мере накопления парниковых газов в атмосфере и по мере увеличения глобальной температуры ущербы от экстремальных гидрологических явлений и разного рода катастрофрастут. Такое мнение разделяют не только средства массовой информации, но и большое число научных сотрудников. Однако, расчёты с использованием наших баз данных по связанным с водой катастрофам, не подтверждают этого. Так, на рис. 8 показаны изменения материальных ущербов (с учётом инфляции) и числа смертельных случаев от наводнений всех типов за конец 1997 – начало 2009 гг. На рис. 9 показаны изменения ущербов и числа пострадавших от засух за 1976–2015 гг. Во всех этих, приведённых в качестве примера, случаях статистически значимые изменения как суммарных годовых, так и средних в расчёте на одно явление, величин – отсутствуют.

Другой интересный результат изучения связанных с водой катастрофических явлений в глобальном масштабе – сопоставление различных параметров ущербов от этих явлений, понесённых, с одной стороны, экономически развитыми регионами мира, а с другой – развивающимися регионами. На рис. 10 эти результаты представлены вместе с соответствующими величинами в среднем для мира и для РФ. Как показывают расчёты, абсолютные величины материальных ущербов как от засух, так и от наводнений – и относительные

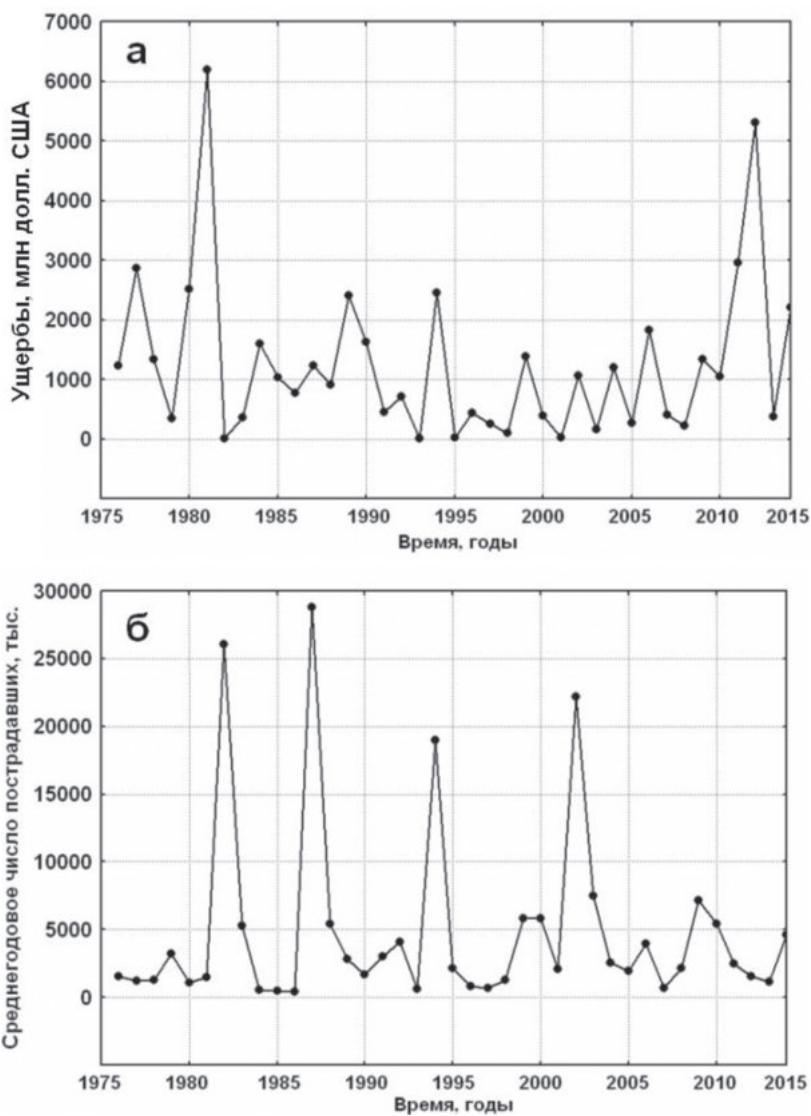


Рис. 9. Изменения во времени ущербов от засух мира (а) и числа пострадавших от засух (б)

величины (в расчёте на одно явление, на единицу площади страны, на душу населения) – в развитых странах больше, чем в развивающихся (рис. 10 б). Однако, доля ущербов в ВВП стран в «богатом»

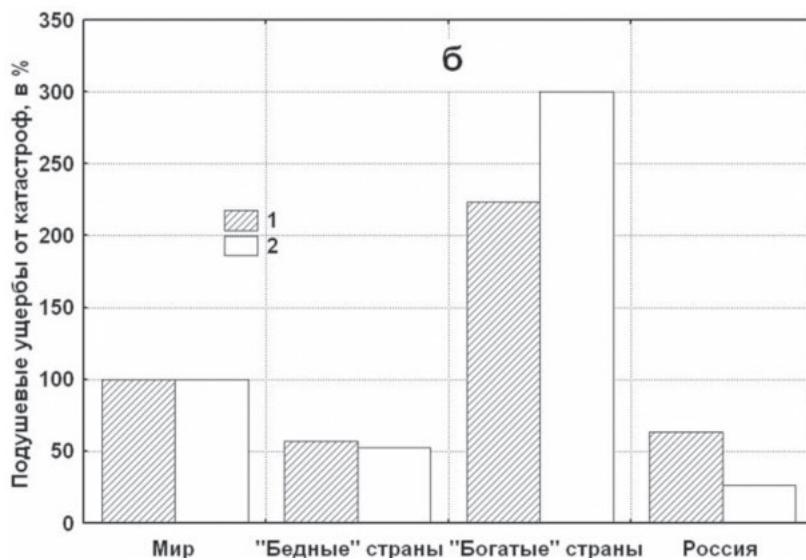
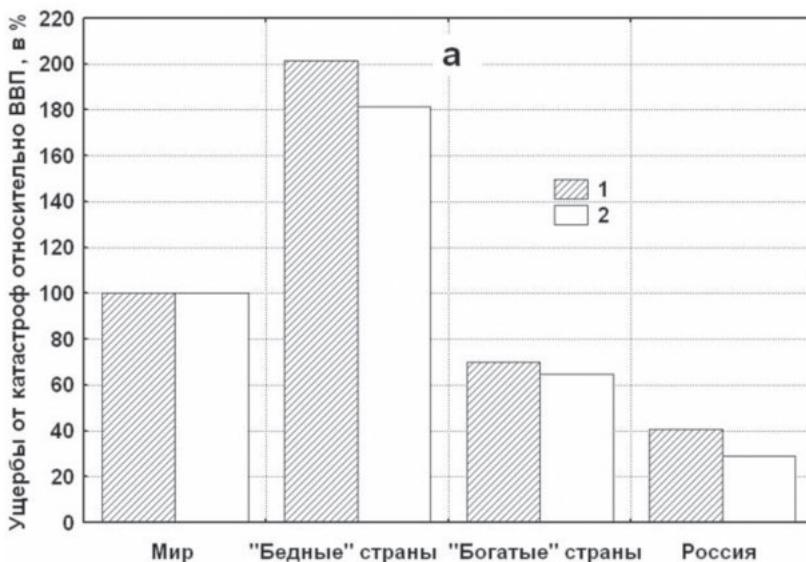


Рис. 10. Финансовые ущербы от засух (1) и наводнений (2) мира в расчете на единицу ВВП (а) и на душу населения (б) в макрорегионах мира с разным уровнем экономического развития и в РФ. Для сопоставимости результаты приведены в процентных модульных коэффициентах: величины соответствующих характеристик, осреднённые по всем странам мира, приняты за 100%

регионе намного меньше, чем в «бедном» (рис. 10 а). На основе этих результатов можно сформулировать гипотезу о том, что в отдалённой перспективе, параллельно с существенным ростом экономики, ущербы от наводнений и засух неизбежно растут – в связи с освоением новых территорий, удорожанием недвижимости и инфраструктуры, увеличением страховых премий и т.д. Однако, по мере экономического развития стран – несмотря на общий рост ущербов от засух и наводнений – хозяйство стран в целом более эффективно использует потенциально затапливаемые или потенциально засушливые территории – и через механизм страхования, перестрахования и фондовых бирж делит ущербы сравнительно равномерно по территориям и отраслям хозяйства.

Приведённая выше гипотеза была сформулирована в работе [ДИ2006]. Показательно, что более поздние расчёты с использованием информации по засухам мира дали ту же качественную картину. Рис. 10 показывает, что связанная с рассматриваемыми природно-социальными катастрофами ситуация в РФ сравнительно благополучна. Однако, если проанализировать соотношение материальных и гуманитарных (число эвакуированных, общее число пострадавших) потерь от наводнений и засух, очевидно, что в РФ есть резервы в первую очередь для уменьшения гуманитарных (социальных) ущербов: соотношение указанных параметров гуманитарных и материальных потерь в РФ меньше, чем в развивающихся странах, но на порядок больше, чем в развитых.

Ввиду ограниченного объёма статьи нет возможности привести полученные в лаборатории глобальной гидрологии другие интересные и важные результаты анализа связанных с водным фактором катастроф мира: статистики различных характеристик катастроф, зависимости параметров ущербов от «природных» параметров явлений, особенности наводнений и засух в пределах различных ареалов и т.д.

### **Сверхдолгосрочное прогнозирование увлажнения и осушения территорий в глобальном масштабе**

Проблема, сформулированная в подзаголовке, носит существенно междисциплинарный характер и разрабатывается в основном в рамках построения численных моделей климатической системы (КМОЦ). Роль гидрологии заключается здесь прежде всего в разра-

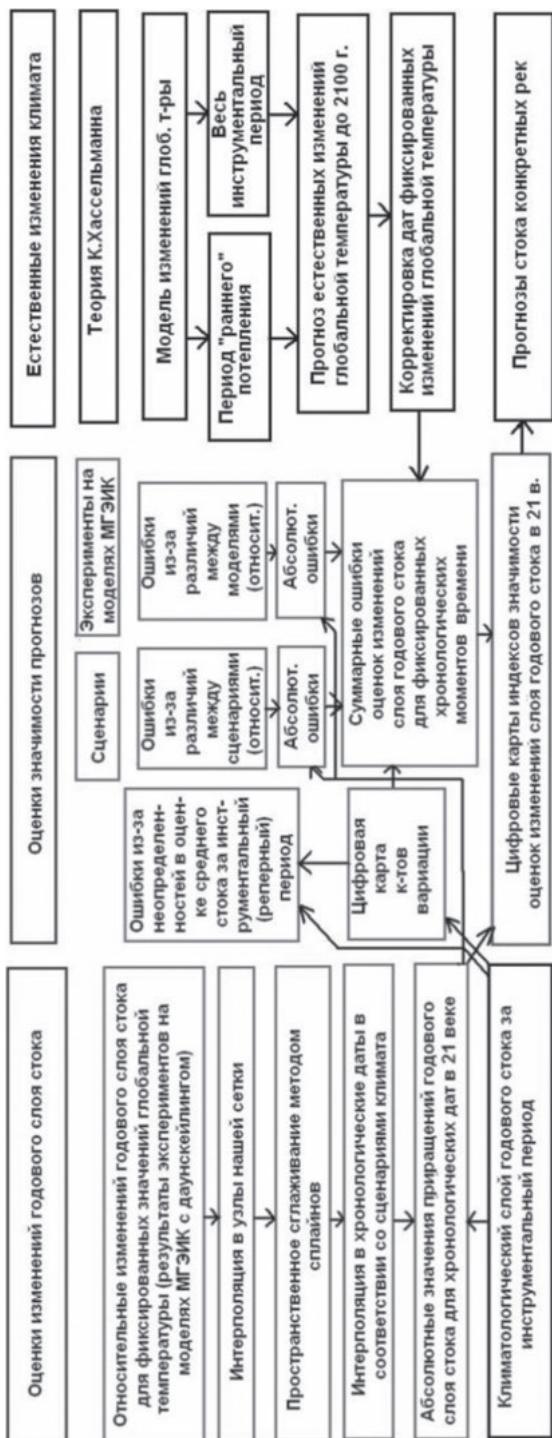


Рис. 11. Блок-схема расчётов оценок неопределённостей прогнозов годового стока в 21 в.

ботке блоков гидрологии суши, которые входят составной частью в модели климатической системы – и в разработке ещё более детальных блоков гидрологии суши, которые служат для «даунскейлинга» результатов, полученных на КМОЦ. Наряду с этим, роль собственно «глобальной гидрологии» виделась нами и в изучении слабо разработанного вопроса о степени достоверности сверхдолгосрочных прогнозов увлажнённости континентов, об источниках неопределённостей и их эффектах в отношении соответствующих. С этой целью нами были исследованы четыре источника неопределённостей оценок увлажнённости суши в отдалённой перспективе: ошибки вследствие расхождений между сценариями эмиссии парниковых газов, из-за расхождений между различными КМОЦ; из-за возможных естественных изменений глобального климата; вследствие ошибок оценок математического ожидания величин стока за «реперный» период наблюдений. Если эффекты первых двух типов неопределённостей приводились ранее в литературе, причём, как правило, по отдельности (например, в [21]), то последние два источника неопределённостей прогнозов практически не изучались. Указанная проблема решалась нами с использованием модельных экспериментов (как «исторических», так и прогностических) на КМОЦ в рамках проектов СМИР-3 и СМИР-5, с использованием даунскейлинга и без него, а также с использованием нашей глобальной базы по речному стоку и результатов её анализа.

Используя алгоритм, схема которого представлена на рис. 11, нами был произведён расчёт стандартов ошибок прогнозов годового слоя речного стока на протяжении 21 в. – для характерных срезов повремени 2025, 2050, 2075 и 2100 гг. На рис. 12, в качестве примера, показаны карты «индекса неопределённости» прогнозов изменений годового слоя стока для середины века: вверху – для 6 сценариев эмиссии парниковых газов МГЭИК [21], внизу – для сценария Московского энергетического института (Академии) [12]. Из рисунка видно, что сценарий МЭИ (который представляется нам более адекватным) даёт статистически незначимые изменения слоя стока из-за парникового эффекта для большей части суши. Лишь на крайнем севере Евразии и Северной Америки и на северо-востоке Евразии изменения превышают стандарты ошибок прогноза (но не превышают двойной стандарт).

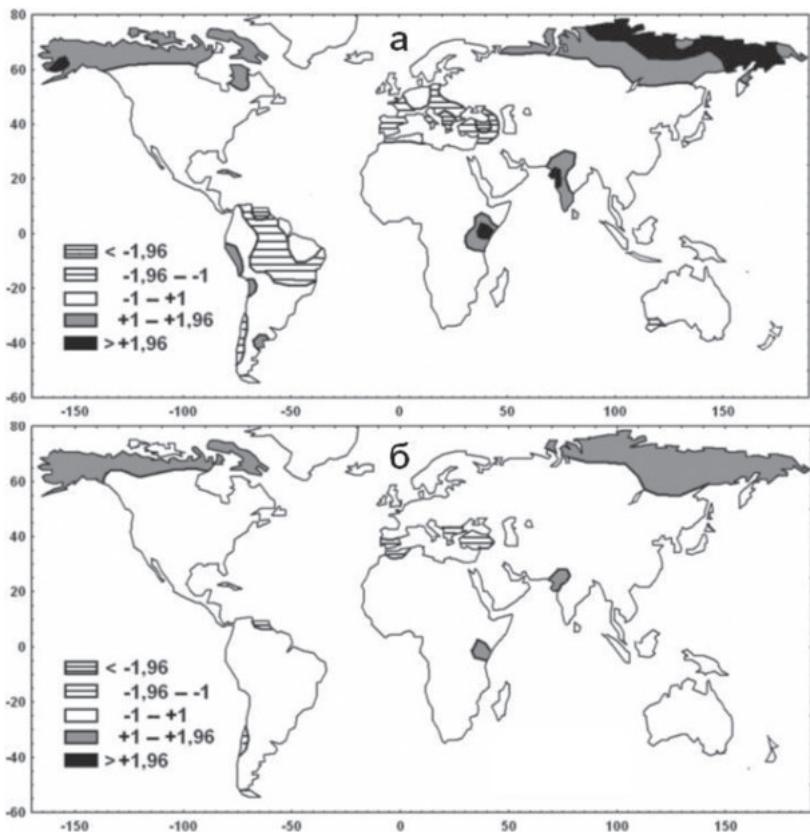


Рис. 12. Карты «индекса неопределённости» прогнозов годового слоя речного стока – отношения прогнозируемых изменений к стандартам ошибок прогноза для середины 21 в. а – с учётом 6 сценариев климата МГЭИК, б – с учётом сценария МЭИ

Сценарии МГЭИК, в свою очередь, дают более значительное увеличение стока на севере и северо-востоке Евразии, превышающие двойной стандарт ошибок – то есть, имеющие обеспеченность более 95%. При этом, в отличие от сценария МЭИ, выделяются и две обширные области уменьшения стока – в приэкваториальных областях Южной Америки и в регионе Большого Средиземноморья. Добавим, что для расчетов использованы результаты моделирования стока на 21 модели климатической системы МГЭИК с так называемым гидрологическим даунскейлингом – с использованием дополнительного гидрологического блока.

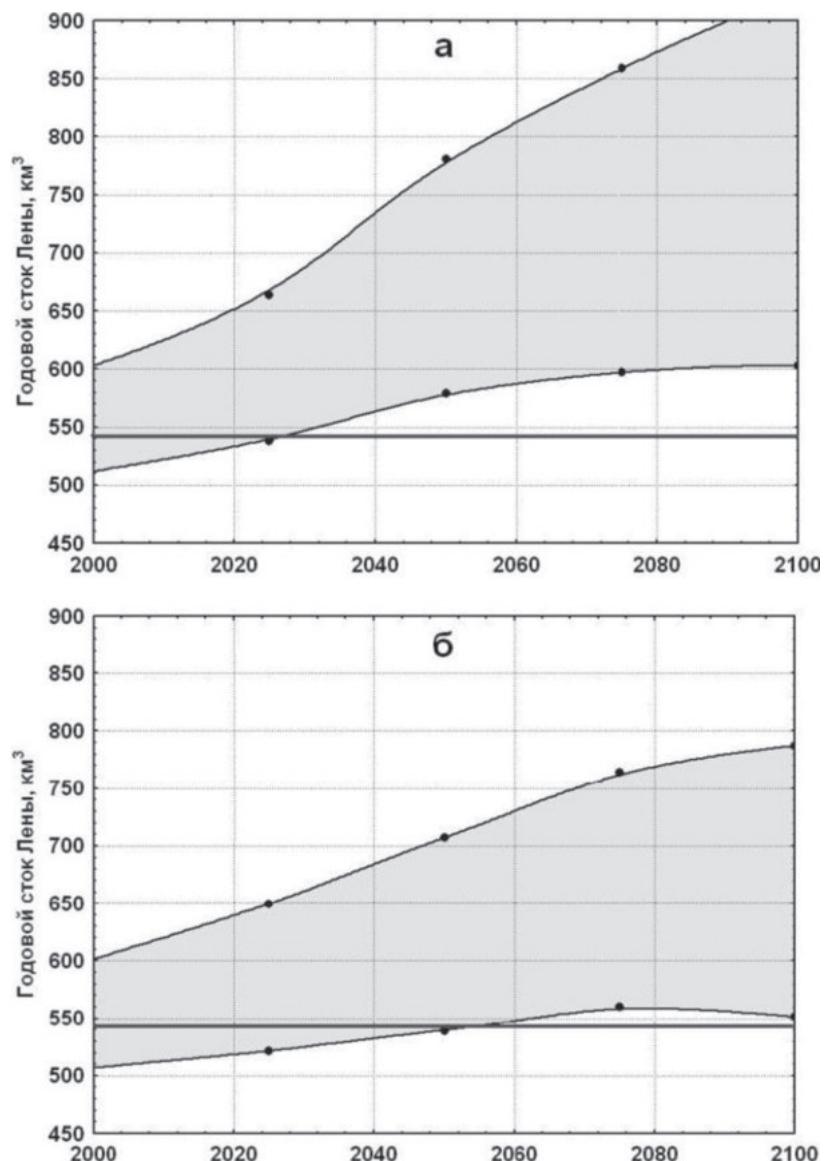


Рис. 13. Изменения годового стока Лены плюс-минус стандарты ошибок прогноза. Горизонтальная прямая – средний сток за реперный период (1960–90 гг.). а – для 6 сценариев МГЭИК, б – для сценария МЭИ

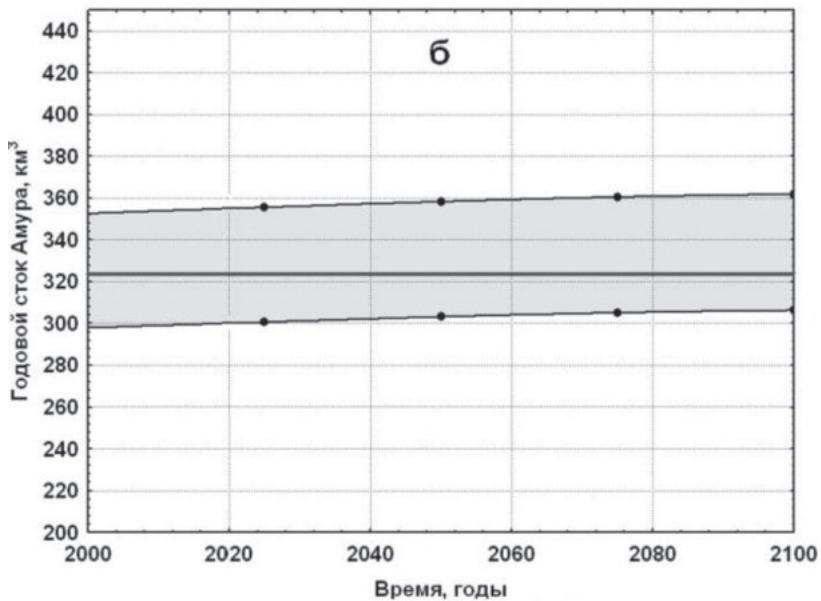
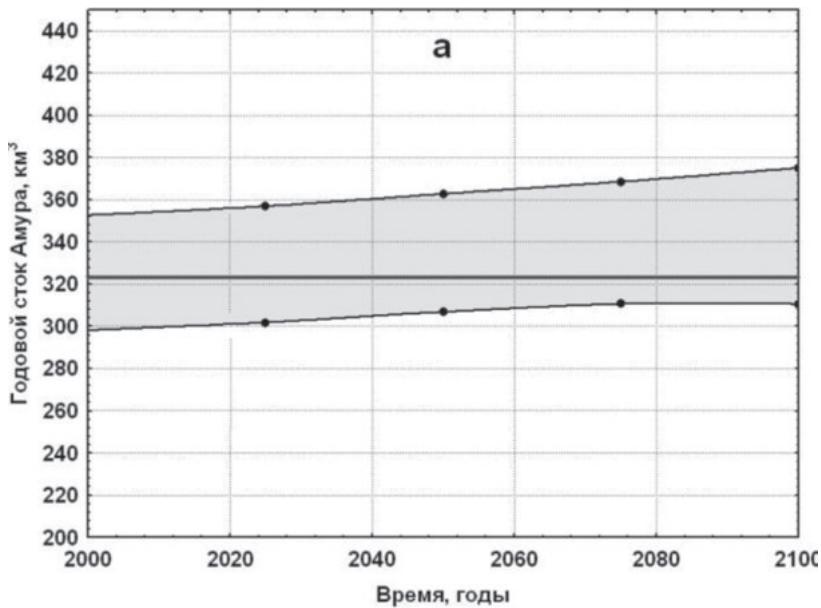


Рис. 14. То же, что рис. 13, но для р. Амур

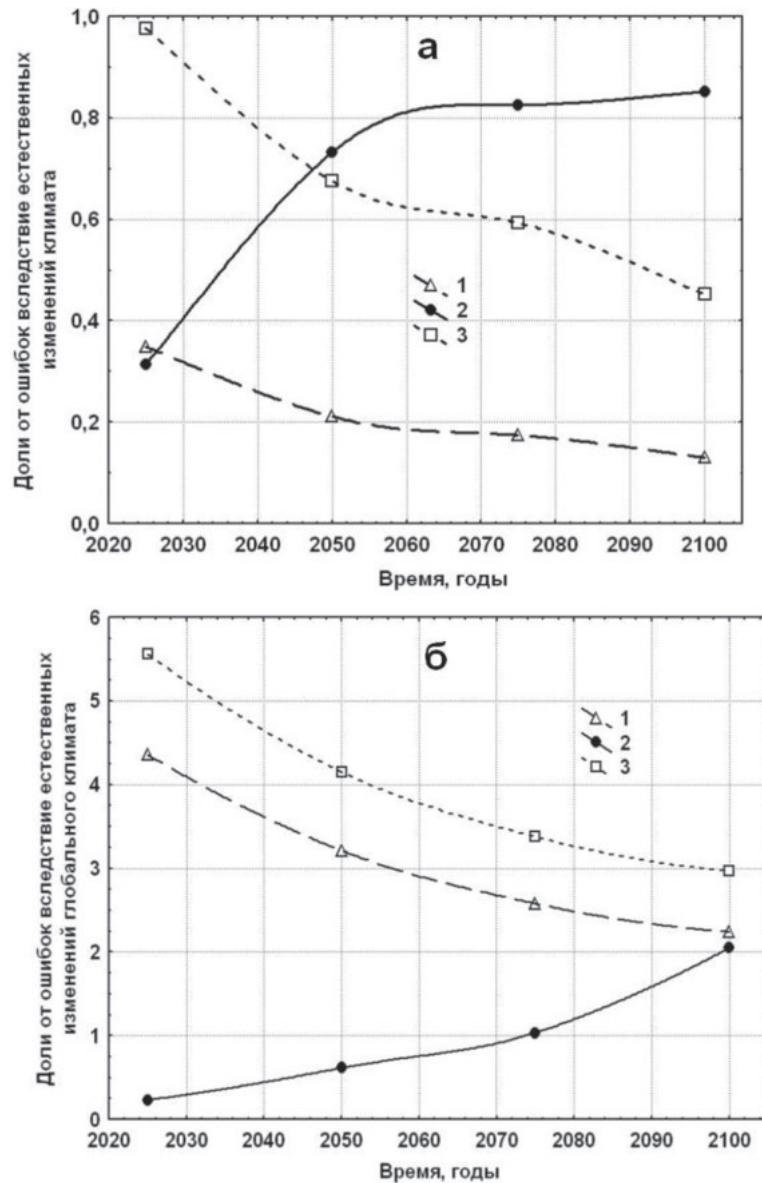


Рис. 15. Отношение стандартов ошибок прогноза годового стока Лены (а) и Амура (б) вследствие ошибок оценок среднего стока за реперный период (1), расхождений между сценариями климата (2), расхождений между моделями климата (3) – к стандартам ошибок вследствие возможных естественных изменений глобального климата

Отметим также, что для конца первой четверти 21 в. аналогичные расчёты дают, с использованием сценария МЭИ, повсеместную статистическую незначимость прогнозируемых изменений слоя годового стока: на всей территории свободной ото льда суши прогнозируемые изменения меньше стандарта ошибок прогноза.

На рис. 13 и 14 показаны рассчитанные нами прогнозы (в среднеквадратичном) изменений годового стока Лены и Амура в створах, близких к устьям. Если прогноз стока Амура не показывает статистически значимых его изменений на протяжении всего 21 в., то Лена (наряду с такими реками, как Юкон, Индигирка, Яна, Колыма) демонстрирует возможность существенного увеличения стока уже к середине века. В то же время, при учёте сценария МЭИ (рис. 13 б) вполне вероятно сохранение современного стока этих рек даже в ближайших к устью створах на протяжении всего века.

Показательна эволюция во времени неопределённостей прогнозов стока рассматриваемых двух рек – «антиподов» (рис. 15). Для Лены характерно преобладание неопределённости вследствие возможных естественных изменений глобального климата на протяжении всего века над всеми остальными неопределённостями. При этом относительная неопределённость вследствие ошибок оценки среднего за реперный период и вследствие расхождений между моделями уменьшается, а неопределенность из-за расхождений между сценариями растёт. Для Амура характерна менее значительная роль неопределённости вследствие возможных естественных изменений глобального климата и другие соотношения между неопределённостями вследствие иных причин.

### Заключение

Ограниченный объём статьи не даёт возможность остановиться на других важных разделах глобальной гидрологии, в частности на исследованиях в области глобальной палеогидрологии, в области изучения изотопного состава водных оболочек, в отношении применения аэрологического метода в гидрологии и многих других. В заключение попытаемся перечислить лишь наиболее насущные проблемы современной глобальной гидрологии.

Само название рассматриваемой области науки говорит о том, что ключевую роль в ней играет сбор и анализ информации о гидроло-

тических объектах и процессах в глобальном масштабе. Наиболее известная организация, занимающаяся сбором информации о важнейшей гидрологической характеристики – речном стоке (центр в г. Кобленц, ФРГ) – как известно, разрешает лишь ограниченное пользование её архивами. Таким образом, продолжает быть насущным формирование актуализированных архивов и баз данных по стоку и другим гидрологическим параметрам в глобальном масштабе.

На повестке дня стоит также объединение электронных баз данных по стоку, параметрам озёр и водохранилищ, характеристикам наводнений и засух. В отношении объединения электронных архивов по стоку и водохранилищам такого рода работа уже ведётся в ИВП РАН/

Актуальной остаётся оценка средних многолетних величин владоодержания основных компонентов климатической системы и средних потоков влаги между ними.

Междисциплинарная проблема гидрологии заключается в том, чтобы добиться более адекватного описания наблюдённых изменений гидрологических характеристик в рамках численных моделей климатической системы (см. об этом в [8]). Очевидно, это будет достигаться путём как совершенствования гидрологических блоков КМОЦ, так и совершенствования глобальных моделей гидрологии суши, используемых для «даунскейлинга» полученных на КМОЦ результатов. Возникающая при этом сложность – неизбежное искашение при даунскейлинге оригинальных балансов и потоков влаги на границе «суши-атмосфера», рассчитанных на КМОЦ.

Другая междисциплинарная проблема – анализ нестационарностей стока и других гидрологических характеристик в климатических масштабах времени, возникающих вследствие общей несбалансированности климатической системы. В частности – оценка критических пространственно-временных масштабов, на которых может проявляться такого рода нестационарность, исследование «масштабной инвариантности» климатической системы применительно к гидрологическим характеристикам и т.п.

Проблемой является также привлечение к исследованиям в области глобальной гидрологии необоснованно, с нашей точки зрения, полузабытых подходов – которые, тем не менее, могут дать ответ на существенные общие вопросы рассматриваемого раздела

науки. Это – построение динамико-стохастических моделей системы «гидросфера-атмосфера» при помощи так называемых моделей средней сложности, при помощи энергобалансовых моделей, «концептуальных» гидрологических моделей.

Необходим дальнейший сбор информации и формирование баз данных по «естественным» параметрам и характеристикам социально-экономических ущербов, вызываемых основными типами катастроф, связанных с водным фактором – наводнений и засух. Имеющиеся ряды такого рода параметров, прежде всего, параметров наводнений, зачастую не позволяют применить для их анализа прикладные методы случайных функций.

Чрезвычайно актуально создание единого центра в форме подразделения АН, который осуществлял бы целенаправленный научный мониторинг, сбор и анализ информации о связанных с водным фактором катастрофах – наводнениях и засухах. Примером такого центра может служить бывшая Дартмутская обсерватория наводнений (США).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Истомина М.Н. Наводнения как глобальная многоаспектная проблема. Вестник РАН, 2002. Т. 72. №12. С. 1–21.
2. Будыко М.И., Герасимов И.П. Тепловой и водный баланс земной поверхности, общая теория физической географии и проблем преобразования природы // Материалы к 3-му съезду Географического общества СССР. Л.: Географическое обществово СССР, 1959. 18 с.
3. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: Академия, 2008. 320 с.
4. Добровольский С.Г. Аномалии глобального тепловлагообмена. М.: Советский геофизический комитет, 1991. 128 с.
5. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М.: Геос, 2002. 232 с.
6. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: Геос, 2011. 660 с.
7. Добровольский С.Г., Истомина М.Н. Наводнения мира. М.: Геос, 2006. 256 с.
8. Добровольский С.Г., Татаринович Е.В., Юшков В.П. Сток важнейших рек России и его изменчивость по данным климатических моделей проекта СМИР-5. Гидрология и метеорология, 2016. №12. С. 44–62.
9. Догановский А.М., Малинин В.М. Гидросфера Земли. СПб: Гидрометеоиздат, 2004. 631 с.
10. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 378 с.

11. Клиге Р.К. Изменения глобального водообмена. М.: Наука, 1985. 248 с.
12. Клименко В.В., Клименко А.В. Глобальное потепление: враг или союзник? М.: Институт проблем энергетической эффективности МЭИ, 2 июня 2010. Адрес в Интернете: [www.energy2010.mpei.ru/\\_Files/KlimenkoVV.ppt](http://www.energy2010.mpei.ru/_Files/KlimenkoVV.ppt).
13. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1981, 255 с.
14. Львович М.И. Вода и жизнь. М.: Мысль, 1986. 256 с.
15. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Ред. В.И. Корзун и др. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 639 с.
16. Привальский В.Е. Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры). М.: Наука, 1985. 184 с.
17. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 256 с.
18. Эдельштейн К.К. Гидрология материков. М.: Академия, 2005. 304 с.
19. 20 Century, 2016. Сайт в Интернете: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds131.1/>.
20. Baumgartner A., Reichel E. Die Weltwasserbilanz. Munhen-Wien.: Oldenburg Verlag, 1975. 175 pp.
21. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Адрес в Интернете: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Ut4f4BuGj84>.
22. CMAP, 2016. Сайт в Интернете: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cmap-cpc-merged-analysis-precipitation>.
23. Dobrovolski S.G. Global climatic changes in water and heat transfer-accumulation processes. Amsterdam et al.: Elsevier, 1992, 282 pp.
24. Dobrovolski S.G. Stochastic climate theory. Heidelberg et al.: Springer Verlag, 2000. 296 pp.
25. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Isotopes of the earth's hydrosphere. Heidelberg et al.: Springer Verlag, 2012. 577 pp.
26. GPCP, 2016. Сайт в Интернете: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcp.html>.
27. GRDC, 2017. Сайт в Интернете: [http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepag\\_node.html](http://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepag_node.html).
28. Hasselmann K. Stochastic climate models part I. Theory // Tellus, 1976. Vol. 28. P. 473–485.
29. Istomina M.N., Dobrovolski S.G. Floods of the world: quantitative analysis of natural characteristics and parameters of social-economic damages. Water Resources, 2016. Vol. 43. No 3, 459–471.
30. Kuznetsova L.P. Use of data on atmospheric moisture transport over continents and large river basins for the estimation of water balances and other purposes. Technical documents in hydrology. Paris: UNESCO, 1989, 150 pp.
31. NCEP/NCAR, 2016. Сайт в Интернете: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

# **Современное состояние и перспективы гидрологии устьев рек**

*М.В. Михайлова, В.Н. Михайлов*

## **Введение**

Устья рек – характерные элементы береговой зоны океанов, морей, озёр; протяжённые в пространстве и очень изменчивые во времени географические объекты; места одновременного и противоположно направленного воздействия рек (их стока воды и наносов) и приёмных водоёмов (изменения их среднего уровня, приливов, стокко-нагонных явлений, волнения). Устья рек были на Земле во все геологические периоды и эпохи, когда существовали как материки с реками, так и окружающие сушу океаны и моря.

Устья рек уже в древние времена стали очагами цивилизаций, здесь селились люди, на плодородных речных отложениях начало развиваться орошаемое земледелие, а в водных объектах – рыболовство. Через устья рек шло освоение европейцами Северной и Южной Америки, русскими землепроходцами – Сибири.

Устья некоторых рек мира были впервые описаны путешественниками и географами Древней Греции и Древнего Рима.

Благоприятное географическое положение устьев рек между сушей и морями, а также богатые водные, земельные, биологические ресурсы этих объектов привели к возникновению здесь крупных городов, промышленных центров, портов и даже столиц ряда государств. Практические потребности (освоение упомянутых ресурсов, поддержание судоходства через устья рек, защита земель и населённых пунктов от наводнений речного и морского происхождения, а в последнее время и развитие в устьях ряда рек нефтегазовой индустрии) стимулировали исследования этих объектов.

К настоящему времени в науках, изучающих устья рек, сформировались две основные научные школы, включающие ряд направлений.

Первой (ещё в 19 в.) сформировалась геолого-геоморфологическая школа, которая основное внимание уделяла исследованию древнедельтовых отложений (частично в связи с поиском месторождений нефти и газа). В рамках этой школы возникло геоморфологическое направление, изучающее развитие дельтовых берегов. Обзор зару-

бежных работ в области геологии и геоморфологии дельт дан в [1]. В нашей стране значительные результаты в геоморфологии дельт и их берегов получили В.П. Зенкович, П.А. Каплин, В.Н. Коротаев, О.К. Леонтьев, Г.И. Рычагов, Г.А. Сафьянов, А.А. Свиточ, И.С. Щукин.

Вторая школа в изучении устьев рек – гидрологическая. Её развитие привело к возникновению новой отрасли науки – гидрологии устьев рек, промежуточной между гидрологией рек и океанологией, и частично связанной с геоморфологией устьев рек. В гидрологической школе оформились два разных направления в изучении устьев рек – отечественное и зарубежное. Различия между ними обусловлены тем, что в Западной Европе и США преобладали устья рек эстuarного типа, а в нашей стране – дельтового. За рубежом в связи с хозяйственным использованием эстуариев были проведены крупные исследования динамики и смешения вод в эстуариях, воздействия штормовых нагонов, процессов заносимости судоходных каналов. Наиболее важные результаты исследований эстуариев за рубежом приведены в [4, 26–30].

Главная особенность гидрологического направления в изучении устьев рек в нашей стране – это широкий географический подход в исследованиях: помимо положений гидрологии рек и океанологии было учтено влияние на устья рек метеорологических и ландшафтных факторов, а также местной хозяйственной деятельности.

Инициаторами изучения дельт в нашей стране были Б.А. Аполлов, В.Е. Ляхницкий, И.В. Самойлов. Особое развитие гидрологических исследований устьев рек получило в 1950–70-е гг. в Государственном океанографическом институте (ГОИН), Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ); сотрудниками ГОИНа и ААНИИ были созданы основы современной отечественной гидрологической школы в изучении устьев рек, проведены первые крупные послевоенные экспедиции в устьях рек, разработаны основы теории устьевых процессов и методов их изучения. В.Н. Михайловым в ГОИНе в 1971 г. издана одна из первых монографий по теории устьевых процессов [7]. В исследования устьев рек большой вклад внесли местные подразделения Гидрометслужбы, специализированные устьевые гидрометстанции и обсерватории. В конце 1970-х гг. к исследованию устьев рек подключ-

чились географический факультет МГУ и Институт водных проблем АН СССР (позже РАН).

Обзоры гидрологических исследований в устьях рек нашей страны приведены в [2, 3, 5–24]. Основные результаты этих исследований будут изложены в последних разделах статьи.

Цели статьи – рассмотреть современное состояние, проблемы и задачи гидрологии устьев рек как науки и описать основные результаты региональных и теоретических исследований устьев рек. При этом основное внимание будет уделено результатам отечественных исследований устьев рек и вкладу авторов статьи в эти исследования.

### **Объект гидрологии устьев рек, его определение, границы, части и типы**

#### **Устье реки как особый географический объект и его научное определение**

Объектами гидрологии устьев рек как науки служат устьевые области рек (или устья рек как краткий синоним). Термин «устьевая область» в 1952 г. предложил И.В. Самойлов в книге «Устья рек», но определения ему не дал. Для устьевых областей (устьев рек) в отечественной научной литературе, включая работы авторов статьи, было дано много сходных по содержанию определений [2, 3, 5–12, 16, 17, 22–24]. Приведём одно из уточнённых авторами определений: Устьевая область реки (устье реки) – особый географический объект, охватывающий район впадения реки в приёмный водоём (океан, море, озеро), обладающий специфическими строением и экологическими условиями, переходным от речного к морскому (озерному) гидрологическим режимом и формирующийся под воздействием особых устьевых процессов – динамического взаимодействия и смешения вод реки и приёмного водоёма, отложения и переотложения речных и частично морских (озёрных) наносов, приводящих к образованию устьевого конуса выноса, а часто и дельты.

Исходя из изложенного, нельзя считать устьем всей реки место, где судоходный рукав дельты впадает в море и от которого ведут километраж (как часто делается в разного рода справочниках). Это место – лишь устье конкретного рукава, его устьевой створ.

#### **Границы устья реки**

Устье реки как область взаимодействия реки и моря (озера) обладает двумя особенностями: оно, во-первых, может занимать обшир-

ную площадь в береговой зоне суши и в прибрежной зоне моря (озера), а во-вторых, изменять своё географическое положение, форму, границы и размеры при крупномасштабных изменениях как уровня моря (озера), так и стока реки.

Поэтому при смещении границ устья реки в пространстве и во времени понятия «современное устье реки», «современная дельта» приобретают большую неопределенность. Например, многие считают «современными» дельты, начавшие формироваться в конце голоценовой трансгрессии Мирового океана, т.е. 7–9 тыс. лет назад. В Италии современной дельтой р. По(*the modern Po delta*) считают дельту, сформировавшуюся в 17 в., после дельты эпохи Возрождения (*the Renaissance delta*). Китайские специалисты называют современной дельту Хуанхэ, формирующуюся в зал. Бохайвань Жёлтого моря севернее Шаньдунского п-ова после прорыва сюда реки в 1855 г.

Предложения авторов статьи по решению упомянутых проблем следующие:

1. Географическое положение устья реки как протяжённого в пространстве природного объекта, его границы и размер зависят прежде всего от крупномасштабных изменений среднего (фонового) уровня приёмного водоёма. Так, морские устья рек при вековом или многолетнем повышении уровня моря (морской трансгрессии) подвергаются частичному или полному затоплению, зона взаимодействия реки и моря и верхняя (речная) и нижняя (морская) границы устья смещаются в сторону суши. В затопленной части старого устья на длительное время сохраняются отложения и формы рельефа существовавшей здесь ранее дельты. Во время понижения уровня моря (морской регрессии) зона взаимодействия вод реки и моря и границы устья смещаются в сторону моря, где начинают отлагаться речные наносы и формироваться новая дельта. В верхней части старого устья сохраняются отложения и формы рельефа ранее существовавшей здесь дельты. Таким образом, в каждый короткий интервал времени устье реки, где происходит взаимодействие вод реки и моря, может находиться в пределах очень протяжённой области реликтов (отложений и форм рельефа более древних устьев этой реки). В качестве примеров реликтов дельт, сформировавшихся при более высоком стоянии уровня приёмного водоёма можно привести отложения и формы рельефа старых дельт Волги, Урала, Терека

и Куры на суше на большом расстоянии от современного берега Каспийского моря. Примером дельт, существовавших при низком уровне Каспия, могут служить остатки объединённой дельты Волги, Урала и Терека на дне Каспийского моря [9, 23]. Следы древних дельт также обнаружены на дне океанов и морей вблизи современных устьев Дуная, Тибра, Янцзы и др.

2. Второй по значимости внешний фактор, влияющий на географическое положение, размеры и границы устьев рек, – это значительные естественные (климатически обусловленные) и антропогенные изменения стока воды и наносов рек [12, 15]. Известно, что в холодные и влажные многолетние периоды сток воды и наносов рек возрастает и что это сопровождается активным выдвижением речных дельт в море. В жаркие и сухие многолетние периоды сток воды и наносов рек уменьшается, что ведёт к замедлению выдвижения дельт в море или даже к их размыву. Интересно, что в Европе при таких изменениях климата отмечалось почти синхронное выдвижение и отступание как речных дельт, так и ледников в Альпах.

Основные антропогенные изменения стока воды и наносов обусловлены регулированием режима рек в результате сооружения крупных водохранилищ. Поэтому уменьшение расхода воды реки в половодье и увеличение в межень, а также отложение наносов в водохранилищах неизбежно влияют на размеры зоны взаимодействия вод реки и моря и особенности развития дельт. Это позволяет считать современными как само устье, так и его режим только в период зарегулирования реки крупными водохранилищами или после значительного изъятия воды на хозяйствственные нужды.

3. Даже в условиях относительной стабильности уровня моря и средних величин стока воды и наносов реки на границы зоны взаимодействия вод реки и моря в каждый момент времени существенное влияние оказывают отклонения гидрологических характеристик во время резких (экстремальных) паводков и половодья или штормовых нагонов от своих средних значений (нормы). Выделять границы устья реки при очень редких гидрологических событиях с практической точки зрения нецелесообразно, так как в этих случаях неоправданно увеличиваются размеры устья реки. Для ограничения предельного размера зоны взаимодействия вод реки и моря ранее

был предложен ряд сложных расчётных методов [5–8]. Авторы статьи считают возможным для такой цели применить более простой способ. В качестве верхней (речной) границы устья реки предложено принимать дальность распространения вверх по течению повышений уровня воды либо при сизигийных приливах, либо при нагонах 10% обеспеченности (с повторяемостью 1 раз в 10 лет) при средних минимальных расходах воды в межень в период после зарегулирования стока реки. В качестве нижней (морской) границы устья реки предлагается принять внешний край зоны опреснения, выделенный по положению в поверхностном слое моря изогалины со значением, отличающимся на 10% от средней солёности вод моря в период средних максимальных расходов воды в половодье при зарегулированном режиме реки.

Таким образом, в настоящее время (конец второго десятилетия 21 в.) современными, по мнению авторов, следует считать само устье и его режим, сформировавшиеся в течение довольно непродолжительного периода времени: после зарегулирования реки и в условиях незначительных изменений уровня приёмного водоёма. Для слабо изменяющихся устьев рек такой период не должен превышать 30–50 лет, для быстро изменяющихся – быть ещё меньше.

### **Районирование устьев рек**

Долгое время в отечественной литературе (в том числе в публикациях [5–7, 17, 22]), отдавалось предпочтение двухчленному принципу районирования устьев рек. В морском устье реки выделяли две крупные части: речную (устиной участок реки, включая дельту, если она имелась) и морскую (устиное взморье, включая водоём эстуарного типа, если он имелся). Однако в результате детального изучения структуры и режима не только отечественных, но и большинства зарубежных устьев рек авторы статьи совместно с С.Л. Гориным [10, 11] разработали новые принципы районирования устьев рек. Предложено дельту (низменность в устье реки, рассечённую сложной и изменчивой гидрографической сетью) считать не частью реки, а особым географическим объектом, входящим самостоятельно в состав устья реки. Обоснования такого предложения: большая часть дельты – это сушица, причём не целиком заливаемая речными водами; в дельте много озёр и болот, не связанных непосредственно с

рекой; для дельты характерен специфический ландшафт, существенно отличающийся от ландшафта обычных речных пойм. Аналогичное заключение касается и эстuarных водоемов в устье реки (полузакрытых водных объектов, в пределах которых речные воды смешиваются с морскими). Такие водоёмы часто настолько изолированы от моря, что признать их частью моря нельзя. Эстуарии могут входить в состав устья реки как особые самостоятельные объекты.

В итоге установлено, что в устье реки могут входить до четырёх частей (рис. 1): находящийся выше вершины дельты или эстуария и подверженный влиянию подпора со стороны моря, приливов и нагонов устьевой участок реки; дельта; эстуарий; подверженная опресняющему воздействию речного стока устьевая зона приёмного водоёма (в морских устьях – устьевое взморье). За пределами приведённых частей устья реки (с учётом критерия выделения их речной и морской границ, установленных выше) находятся приустиной участок реки, куда в межень могут распространяться очень крупные нагонные волны, и предустинное пространство моря, где в период очень крупного половодья может оказываться некоторое опресняющее влияние реки (рис. 1). Новые принципы районирования устьев рек уже применяются при описании устьев рек России [3].

### **Типизация устьев реки и их частей**

В научной литературе есть много типизаций (классификаций) устьев рек и их частей (в том числе дельт и эстуариев); их анализ приведён [1, 2, 4–12, 17, 20, 22, 24, 26–29, 32]. Авторы настаивают, что есть большие противоречия в типизациях дельт, эстуариев и устьев рек в целом. Так, часто любые устья называют эстуариями, в одних случаях дельту считают одним из типов эстуария, в других – эстуарий считают одним из типов дельты. Ряд отечественных геоморфологов подразделяет все устья на два типа: дельты и эстуарии, хотя эти объекты – всего лишь части устья реки.

Предложения авторов по типизации отдельных частей устьев рек сводятся к следующему. Устьевые участки реки по морфологии можно подразделить на два типа: с широкими заливаемыми поймами и без пойм или с обвалованными поймами. По гидрологическому режиму эти участки делятся на три типа: с преобладанием

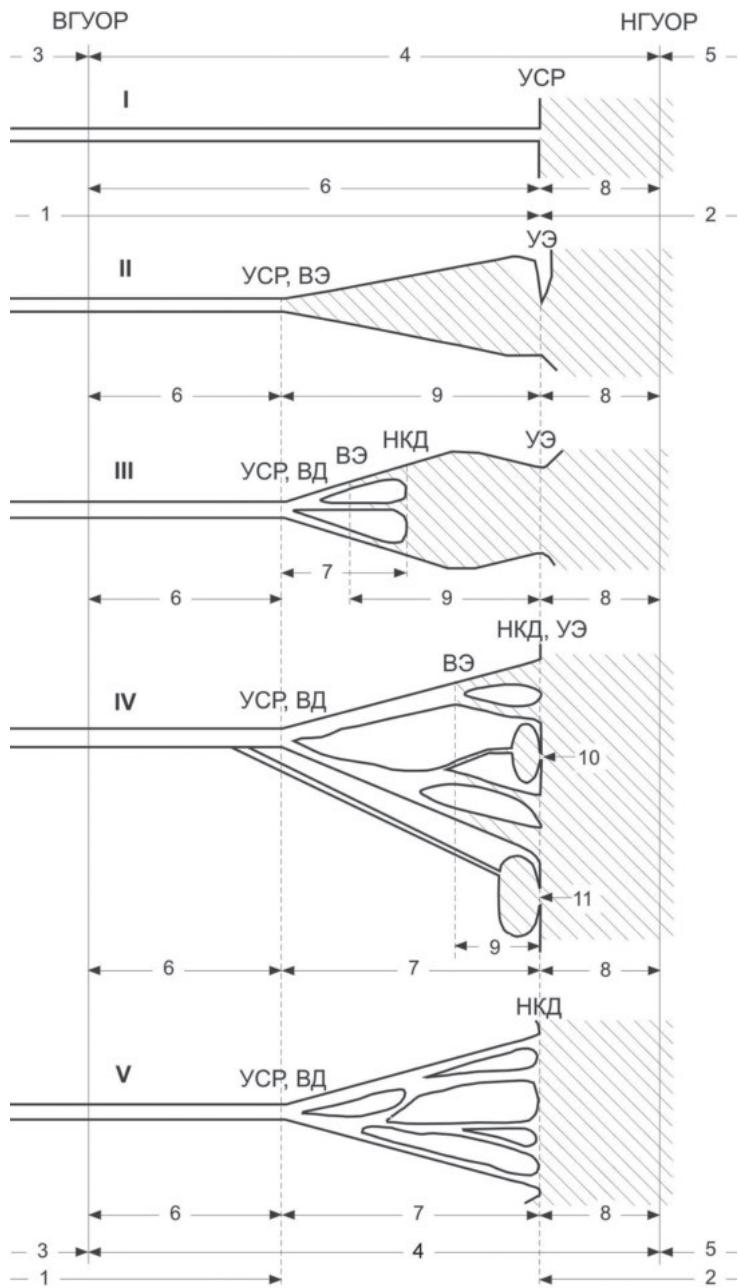


Рис. 1. Схема типизации и районирования устьевых областей рек (УОР).

Типы УОР: I – простая (П); II – эстуарная (Э); III – эстуарно-дельтовая (с дельтой выполнения) (ЭД); IV – дельтово-эстуарная (с дельтой выдвижения) (ДЭ); V – дельтовая (Д). 1 – река; 2 – приёмный водоём (океан, море, озеро); 3 – приустьевой участок реки; 4 – устьевая область реки (УОР); 5 – предустьевое пространство приёмного водоёма (океана, моря, озера); 6 – устьевой участок реки (УУР); 7 – дельта реки (ДР); 8 – устьевая зона приёмного водоёма (океана, моря, озера) (УЗПВ); 9 – эстуарий реки (ЭР); 10 – устьевая лагуна (дельтовая); 11 – устьевая лагуна (придельтовая); ВГУОР – верхняя граница УОР; НГУОР – нижняя граница УОР; ВД – вершина дельты; НКД – нижний край дельты (МКД – морской край дельты, ОКД – озерный, ЭКД – эстуарный); ВЭ – вершина эстуария; УЭ – устье эстуария; УСР – устьевой створ реки. Штриховкой выделена зона смешения водных масс реки и приёмного водоёма (океана, моря, озера)

влияния приливов; с преобладанием влияния нагонов; подвергшиеся влиянию подпора при поднявшемся уровне моря (озера).

Авторы статьи в своих исследованиях речных дельт придерживаются следующих принципов типизации этих объектов [6, 8, 10, 11, 16, 17, 19, 20]: все дельты подразделяются на два типа – дельты выполнения (заполнения), формирующиеся в верхних частях водоёмов эстуарного типа (лиманах, лагунах и др.), и дельты выдвижения, формирующиеся в прибрежной части приёмного водоёма. Кроме того, авторы подразделяют все дельты на неприливные и приливные. При типизации неприливных дельт выдвижения авторы статьи придерживаются предложений О.К. Леонтьева (1955) и подразделяют дельты по степени воздействия на них речного стока воды и наносов, с одной стороны, и морского волнения, с другой, и как следствие, по характеру морского края дельты (МКД). Выделено пять типов дельт: 1) лопастные с сильно изрезанным МКД; 2) лопастные со слабо изрезанным МКД; 3) дугообразные с изрезанным МКД; 4) дугообразные с выровненным МКД; 5) с прямолинейным МКД. В учебнике [6] эта типизация дельт выдвижения дополнена некоторыми количественными параметрами по степени выдвижности дельты в море и изрезанности МКД, а также количественным критерием соотношения воздействия на МКД реки (её стока наносов) и моря (энергии волнения).

Обзоры предложений по типизации эстуариев приведены в [4–6, 8, 10, 11, 26–30]. Поскольку эстуарии изучены в западных странах лучше, чем в России, авторы в основном придерживаются типизаций эстуариев, изложенных в [26–30]. По морфологии и происхождению эстуарии подразделяют на затопленные речные долины (лиманы, губы), лагуны, воронкообразные приливные эстуарии, фиорды. По величи-

не приливов эстуарии, согласно [26, 28], можно подразделить на неприливные (величина прилива  $\Delta H_{\text{пр}} < 0,2 \text{ м}$ ), микроприливные ( $\Delta H_{\text{пр}}$  от 0,2 до 2 м), мезоприливные ( $\Delta H_{\text{пр}}$  от 2 до 4 м), гиперприливные ( $\Delta H_{\text{пр}} > 4 \text{ м}$ ). По степени вертикального перемешивания вод эстуарии делят на такие типы: с полным перемешиванием, с частичным перемешиванием, с клином осолонённых вод у дна, с узким слоем пресных вод у поверхности.

Устьевые зоны приёмных водоёмов (устьевые взморья) по рельефу дна подразделяют на приглубые (уклон дна  $> 1\%$ ) и отмелые (уклон дна  $< 1\%$ ); по преобладающей солёности воды  $S$  на пресные ( $S < 1\%$ ), солоноватые ( $S$  от 1 до  $24,7\%$ ), солёные ( $S$  от 24,7 до  $50\%$ ), гиперсолёные ( $S > 50\%$ ); по величине приливов – так же, как эстуарии.

Устьевые области рек (устья рек) авторы статьи подразделяют по географическому расположению на океанические, морские, озёрные. По величине приливов – так же, как устьевые взморья или эстуарии. Более сложна типизация устьев рек по строению. Авторами в [8, 10–12] предложена новая типизация устьев рек (рис. 1). Устья рек подразделены на пять типов: I – простые (например, устья малых рек Чёрноморского побережья Кавказа); II – эстuarные бездельтовые (устья Мезени, Пенжины, Темзы); III – эстuarно-дельтовые с дельтой выполнения (устья рек Оби, Енисея, Печоры, Днепра, Днестра); IV – дельтово-эстuarные, главный элемент которых – крупная дельта, имеющая либо лагуны вдоль МКД (устья Кубани, Сулака, Куры, Нила), либо эстuarные приливные расширения в устьях рукавов (устья Иравади, Амазонки, Ориноко); V – дельтовые без эстuarных водоёмов (устье Волги).

### **Предмет гидрологии устьев рек. Устьевые процессы и влияющие на них факторы**

Предмет гидрологии устьев рек как естественной науки – это не только устья конкретных рек как географические объекты и пространственно-временные изменения их гидрологического режима и строения, но и сложный комплекс процессов, называемых устьевыми, которые формируют эти объекты и их изменяют. Авторская классификация таких процессов приведена в [5, 6, 8, 16]. Устьевые процессы включают: физические процессы, создающие рассматриваемые объекты и определяющие их пространственно-временные изменения; химические процессы, формирующие химический

состав и качество вод в устьях рек; биохимические процессы, управляющие взаимодействием биоты и химического состава вод; биологические процессы, регулирующие развитие наземной, водной и околоводной биоты в устьях рек.

Главная роль в формировании устьев рек принадлежит физическим процессам [6, 8, 16]: динамике водного потока и водному балансу дельт; смешению речных и морских (озерных) вод; движению наносов и их балансу в устьях рек; морфологическим (эрэзионно-аккумулятивные) процессам, включающим русловые деформации в водотоках, динамику МКД, изменения дна устьевого взморья. В.Н. Михайловым и М.М. Роговым в [17] эти процессы в совокупности названы гидролого-морфологическими. Позже этот термин получил признание в отечественной литературе по устьям рек [3, 16, 22–24]. Именно этим процессам будет уделено основное внимание при рассмотрении современного состояния гидрологии устьев рек и вклада в неё авторов статьи.

На гидролого-морфологические процессы в устьях рек влияет комплекс внешних и внутренних естественных и антропогенных факторов. Авторская типизация этих факторов с характеристикой их воздействия на процессы в устьях рек приведена в [3, 6, 8, 9, 13–18, 21, 23]. К внешним речным факторам относятся сток воды и наносов реки и его естественные (климатические) и антропогенные изменения. Внешние морские факторы включают изменения среднего уровня моря, приливы, нагоны, волнение. К внутренним (местным) антропогенным факторам можно отнести следующие: обвалование рукавов дельт; водозабор из устьевых водотоков и водоёмов на хозяйствственные нужды; углубление, перекрытие, спрямление водотоков дельты и сооружение прорезей через устьевые бары для улучшения условий судоходства; мелиорация дельт (обводнение водоёмов, орошение или осушение земель); инженерные мероприятия по защите земель и населённых пунктов в дельте от затопления, а берегов водотоков или МКД от размыва и др.

### **Основные результаты региональных исследований устьев рек**

Хотя устья крупных рек мира стали изучать давно, первые крупные исследования устьев конкретных рек с целью хозяйственного освоения их природных ресурсов были начаты лишь в 19 в.

В России к настоящему времени наиболее изученными оказались устья рек Волги, Терека, Сулака, Дона, Кубани, Невы, Северной Двины, Оби, Енисея и Лены. Обзоры результатов исследований устьев основных рек России приведены в [3, 9, 22–24]. За рубежом лучше всего изучены дельты рек Миссисипи, Колумбия, Маккензи, Меконга, Нила (обзоры даны в [25, 32]), эстуарии Сены, Темзы, Делавэр, Колумбии (обзоры приведены в [4, 28]).

Авторы статьи собрали, систематизировали и опубликовали в [6, 9, 12, 14, 19, 20, 23] современные количественные данные о главных факто-рах, влияющих на устья рек России и мира: стока воды и наносов, а также изменений уровня у берегов морей (с учётом просадки грун-та).

Авторы принимали участие в полевых исследованиях устьев рек Волги, Терека, Сулака, Кубани, Енисея, Лены, Яны, Индигирки, а также устьев рек государств, ранее входивших в состав СССР, – Аму-дарьи, Риони, Дуная, Днепра и Южного Буга. С участием авторов изданы крупные коллективные монографии по гидрологии устьев рек Волги (1998), Терека и Сулака (1993), устьев всех рек Каспийского региона (2013), Енисея (1991), Яны (1998), Индигирки (2001), Дуная (1963, 2004) и Кубани (2010).

Михайлова и Михайлов организовали подготовку по единой методике и издание аналитических обзорных работ по гидрологии устьев зарубежных рек, недостаточно известных в нашей стране. Были опубликованы (в основном в журнале «Водные ресурсы») отдельные статьи по устьям рек Риони, Дунай, По, Тибр, Рона, Эбро,盧ара, Сена, Рейн и Маас, Темза, Эльба, Висла, Неман (Нямунас) (зарубежная Европа); Хуанхэ, Янцзы, Чжуцзян (Жемчужная), Хонгха (Красная), Меконг, Чаупхрая, Иравади, Ганг и Брахмапутра, Годавари, Шатт-эль-Араб, Инд (зарубежная Азия); Нил, Конго, Нигер, Сенегал, Гамбия, Замбези (Африка); Фрейзер, Колумбия, Колумбия, Маккензи, Св. Лаврентия, Делавэр, Саскуэханна и Потомак, Миссисипи (Северная Америка); Ориноко, Амазонка (Южная Америка). В этих публикациях помимо организаторов всего цикла работ приняли активное участие Е.Н. Долгополова, М.В. Исупова (ИВП РАН), Н. И. Алексеевский, Д.Б. Бабич, В.В. Иванов, В.Н. Коротаев, В.И. Кравцова, Д.В. Магрицкий, а также аспиранты и студенты кафедры гидрологии сушки географического факультета (МГУ). В написании обзорных ста-

тей также участвовали специалисты из Грузии (Ш.В. Джоашвили), Украины (В.Н. Морозов и др.), Литвы (Р. Жаромскис), Италии (П. Беллотти и др.), Китая (Ц. Ли, Ш. Лю и др.).

### **Основные результаты теоретических исследований устьев рек**

#### **Динамика водного потока и водный режим**

**Сопряжение реки и приёмного водоёма при установившемся режиме.** В 1950-е гг. в отечественной гидрологической литературе велась дискуссия о характере гидравлического сопряжения реки и приёмного водоёма. По одной версии, в связи с тем, что сезонные изменения уровня воды в водоёме невелики, а в реке могут быть очень большими, на нижнем участке реки всегда должна формироваться выпуклая кривая гидравлического спада; по другой версии, основанной на наблюдениях в устьях рек в межень, водоём всегда создает подпор во впадающей в него реке и здесь формируется вогнутая кривая гидравлического подпора.

Чтобы разобраться в этом вопросе, Михайловым в [7] были проведены детальные расчёты форм сопряжения водного потока (условной реки) с приёмным водоёмом (условным морем) в гипотетическом прямоугольном русле с постоянным уклоном дна с помощью строгого гидравлического метода Чарномского. На большом удалении от водоёма было задано ступенчатое изменение расхода воды  $Q_p$ , на нижнем конце русла, в его устьевом створе – ступенчатое изменение уровня приёмного водоёма  $H_m$ . На верхнем конце участка глубина потока (глубина равномерного режима, или «нормальная» глубина) зависит только от величины  $Q_p$ , задана графиком  $h_0=f(Q_p)$  и может быть рассчитана по формуле Шези–Маннинга; в устьевом створе глубина русла  $h_y$  зависит только от  $H_m$ .

Расчёты показали следующее: равномерный режим на участке, когда средние скорости потока  $V$ , уклон водной поверхности  $I$  и глубина  $h$  вдоль потока неизменны, может быть лишь при условии  $h_0=h_y$ ; если  $h_0>h_y$ , то на участке русла формируется выпуклая кривая гидравлического спада ( $V$  и  $I$  вдоль потока увеличиваются,  $h$  уменьшается); если  $h_0<h_y$ , то формируется вогнутая кривая гидравлического подпора ( $V$  и  $I$  вдоль потока уменьшаются,  $h$  увеличивается); при заданной величине  $H_m$  условие  $h_0=h_y$  выполняется только при единс-

твенном расходе воды  $Q_p$ , а при заданной величине  $Q_p$  – только при единственной величине  $H_m$ ; уровни воды в разных пунктах участка (кроме его концов) выражены семейством кривых вида

$$H_i = \phi(Q_p, H_m). \quad (1)$$

Полученные в результате расчётов выводы применимы и к устьям рек в естественных условиях. Построенные в [7, 8] типовые графики связи между разными гидрологическими характеристиками в зоне переменного спада или подпора могут послужить образцами при обработке данных наблюдений в устьях рек.

В настоящее время, в условиях ускоряющегося повышения уровня Мирового океана и связанных с ним морей [12, 14, 15], актуальным становится расчёт и прогноз распространения в устья рек подпора со стороны моря. Для точного расчёта кривой свободной поверхности в реках при подпоре можно использовать, например, метод Н. Н. Павловского. Однако в многорукавных системах такой расчёт затруднён. Поэтому авторы статьи применяли простой эмпирический метод расчёта дальности подпора  $L_{под}$  (км), используя формулу

$$L_{под} = k \Delta H_m / I, \quad (2)$$

где  $\Delta H_m$  (м) – величина повышения уровня моря,  $I$  (%) – уклон водной поверхности на участке в межень до начала повышения уровня моря. Применение формулы (2) для устьев рек Урала, Терека, Сулака и Куры в период повышения уровня Каспийского моря в 1978–95 гг. на 2,35 м дало правдоподобные результаты. Для всех перечисленных дельт повышение уровня воды на их морском крае  $\Delta H_{мкд}$  совпадало с повышением уровня моря  $\Delta H_m$ . Исключением стало устье Волги, где из-за наличия обширного мелководного взморья (так называемой буферной зоны) подъем уровня на МКД составил лишь 0,8 м, т.е. был намного меньше  $\Delta H_m$ . Поэтому в формуле (2) для дельты Волги надо учитывать не  $\Delta H_m$ , а  $\Delta H_{мкд}$ . Расчёты для всех устьев дали наилучшие результаты при  $k=2,0$ , что соответствует кривой подпора в виде части полуокружности.

При оценке влияния на устья рек изменений среднего уровня моря (фонового, осредняющего сезонные, приливные, сгонно-нагонные колебания уровня моря) авторы учитывали, что реальное (фиксированное на гидрологическом посту) многолетнее изменение уровня моря является относительным, так как становится алгебраичес-

кой суммой эвстатического повышения или понижения уровня моря и величины просадки грунта, которая всегда сопровождается опусканием реперов и других устройств поста и, как следствие, «видимым» ростом уровня моря на этом посту в береговой зоне. В дельтах рек просадка грунта может быть вызвана естественным уплотнением и обезвоживанием влажных и рыхлых отложений, а также антропогенными факторами – откачкой нефти, газа, пресных подземных вод. Если эвстатическое повышение уровня Мирового океана и связанных с ним морей в настоящее время составляет 3–4 мм/год, то вследствие только просадки грунта рост уровня может достигать 5–20 мм/год [12, 14, 31].

**Сопряжение реки и приёмного водоёма при неустановившемся режиме.** Для приближённой оценки дальности распространения приливов в реки и рукава дельт  $L_{\text{пр}}$  авторы статьи используют известную формулу В.Е. Ляхницкого, сходную по структуре с формулой (2) и имеющую вид  $L_{\text{пр}} = kA/I_{\text{ср}}$ , где  $A$  – амплитуда прилива в устьевом створе,  $I_{\text{ср}}$  – средний уклон водной поверхности в русле за приливный цикл,  $k$  – коэффициент, равный 1 или 1,5.

Для расчёта нагонных колебаний уровня воды в реке или рукахах дельт Михайловым разработан [6–8] и проверен на примере устьев Дона и Дуная специальный метод, основанный на экспоненциальном законе затухания волн нагонов в устьях рек. Расчётная формула следующая:

$$\Delta H_{\text{нр},x}/\Delta H_{\text{нр},0} = \exp(-kx), \quad (3)$$

где  $\Delta H_{\text{нр},x}$  – высота нагона (м) над предшествующим уровнем воды на расстоянии  $x$  от устьевого створа (км),  $\Delta H_{\text{нр},0}$  – то же в устьевом створе,  $k$  – декремент затухания нагона, равный  $k = aQ + b$ , где  $Q$  – расход воды до начала нагона. Из формулы (3) после её логарифмирования можно получить выражение для дальности распространения нагона в км:

$$L_{\text{нр}} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{\Delta H_{\text{нр},0}}{0,05} \right); \text{ здесь } 0,05 \text{ – минимальное повышение уровня (м),}$$

которое можно надёжно измерить.

Михайловым впервые проведено совместное исследование на экстремумы уравнений движения, неразрывности и транспортирующей способности водного потока для приливного цикла в устье реки [6, 8]. В частности, математически доказано, что поворот течения с прямого (отливного) на обратное (приливное) происходит

немного позже малой воды (наступления минимального уровня в отливную фазу), а поворот течения с приливного на отливное – немного позже полной воды (максимального уровня в приливную фазу); максимальные скорости прямых течений наблюдаются приблизительно в середине периода падения уровня, а максимальные обратные – в середине периода роста уровня; наибольшая мутность воды отмечается в течение приливного цикла дважды, немного опережая экстремумы скоростей течения. В результате проведённого анализа построены типовые петлеобразные графики связи между взятыми попарно гидрологическими характеристиками [6, 8]; эти графики могут помочь при обработке данных измерений. Итоги анализа подтверждены результатами наблюдений в приливных устьях рек Северной Двины, Мезени, Темзы и Меконга.

**Распределение стока воды по рукавам дельт.** В конце 1960-х гг. сначала К.В. Гришаниным, а позже Ивановым были предложены два схожих итерационных гидравлических метода расчёта распределения расходов воды по рукавам дельт. Вместо этих сложных методов авторы статьи в своих расчётах отдали предпочтение разработанному одним из них и изложенному в [6, 8, 13, 16, 17] более простому аналитическому способе расчёта, названного методом общих (суммарных) модулей сопротивления, рассчитываемых по особым правилам отдельно для последовательного, параллельного и последовательно-параллельного соединения участков русловой сети дельты. Предложенный метод пригоден для расчёта распределения расходов воды в прогрессивно дробящейся сети водотоков любой сложности. Он базируется на трех допущениях: полного водного баланса в русловой сети всей дельты и в отдельных ее узлах; равенства падения уровня  $\Delta z$  по любому направлению от вершины дельты до моря; квазиравномерного движения воды в водотоках дельты, описываемого уравнением  $\Delta z = FQ^2$ , где  $F$  – модуль гидравлического сопротивления водотока, не зависящий, согласно постулату Павловского, ни от  $\Delta z$ , ни от  $Q$ . Модуль сопротивления рассчитывается по уравнению  $F = Ln^2/B^2h^{1/3}$ , вытекающему из формулы Шези–Маннинга; здесь  $L$ ,  $B$ ,  $h$  – соответственно длина участка русла, его средняя ширина, средняя глубина,  $n$  – коэффициент шероховатости. Например,

$$\text{для простой двухрукавной дельты имеем } \frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} \text{ и } Q_1 + Q_2 = Q_0.$$

При заданной величине расхода воды реки выше вершины дельты  $Q_0$  в любом узле разветвления расход воды будет больше в том рукаве, ширина и глубина которого больше, а длина и шероховатость меньше, чем в смежном. Применение авторами этого метода расчёта распределение расходов воды по рукавам гипотетической дельты [13, 16] и дельт Куры, Дуная и др. подтвердило следующий важный вывод. Русловая сеть любой дельты – это единая система взаимосвязанных морфологически и гидравлически элементов. Естественное или антропогенное изменение размера русла и шероховатости дна любого водотока в этой системе неизбежно должно привести не только к изменению доли водного стока в этом водотоке и ниже его по течению, но и в смежных водотоках, а также распространиться вверх по течению вплоть до вершины дельты и даже в совсем другую её часть. Такая особенность дельт часто не учитывается при осуществлении инженерных мероприятий в этих объектах.

**Водный баланс дельт.** Долгое время считалось, что все дельты из-за испарения воды теряют часть водного стока реки. Наблюдения в дельтах Волги, Терека, Урала, Дуная, Или, Инда, Нила подтверждают такое мнение. Однако более детальные исследования в других дельтах показали, что роль дельт в изменении среднемноголетнего водного стока рек более сложная (обзор проблемы дан в [6, 8]). В дельтах как азональных географических объектах увлажнение создаётся не столько местными осадками  $P$ , сколько водным стоком самой реки. Поэтому реальное испарение с поверхности дельты значительно больше зональной величины испарения и приблизительно равно зональной величине испаряемости  $E_0$ . С наиболее сухих частей дельты испарение меньше  $E_0$ , с поверхности водотоков и водоёмов – равно  $E_0$ , с болот, плавней, заросших водоёмов из-за большой роли транспирации – больше  $E_0$ . В итоге изменение среднемноголетнего стока воды реки в пределах дельты  $\Delta W_Q$  ( $\text{км}^3/\text{год}$ ) зависит от соотношения  $P$  и  $E_0$ :

$$\Delta W_Q = (P - E_0) F_d \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где  $P$  и  $E_0$  в  $\text{мм}/\text{год}$ , площадь дельты  $F_d$  в  $\text{км}^2$ .

Проведённые авторами расчёты для многих дельт мира [6, 8, 13, 16] показали, что в областях избыточного увлажнения (здесь индекс сухости, по М.И. Будыко,  $E_0/P < 0.4$ ) и в областях достаточного увлажнения ( $E_0/P$  от 0.4 до 1.0) водный баланс дельт положительный и в их пре-

делах происходит добавление водного стока, а в областях недостаточного увлажнения ( $E_0/P$  от 1,0 до 3,0) и сухих ( $E_0/P > 3,0$ ) водный баланс дельт отрицательный и в их пределах происходит потеря водного стока. Укажем дельты, где добавление водного стока наибольшее – Амазонки, Ганга и Брахмапутры, Нигера, Меконга, Иравади, Красной.

**Динамика речной струи на устьевом взморье.** В работах [5, 6] было доказано теоретически и подтверждено данными наблюдений, что на открытом, приглубом и неприливном устьевом взморье средняя скорость течения в инерционной струе, вытекающей из реки или рукава дельты затухает в сторону моря по экспоненциальному закону

$$V_x/V_0 = \exp(-kx/h_0). \quad (5)$$

Здесь  $V_0$  – скорость течения в начальном створе струи, где глубина равна  $h_0$ ,  $V_x$  – скорость течения на расстоянии  $x$  (м) вдоль струи,  $k$  – декремент затухания, изменяющийся в узких пределах от 0,0020 до 0,0030.

**Влияние на водный режим дельт местных водохозяйственных и гидротехнических мероприятий.** В работе [13] авторы систематизировали сведения о закономерностях воздействия инженерных мероприятий в дельтах на их гидрологический режим и рассмотрели некоторые методы расчёта этого воздействия: способы расчета влияния двустороннего обвалования рукавов на повышения в них уровня воды; приёмы оценки противоречивого воздействия крупных водозаборов и вододелителей на режим дельт; методы прогноза воздействия на режим дельт мероприятий по улучшению условий судоходства (углубления рукавов и их устьевых баров, спрямления и перекрытия рукавов и др.); приёмы оценки влияния на водный баланс дельт их осушения или обводнения и др.

### Смешение речных и морских вод

**Устьевая зона смешения.** В морских устьях рек взаимодействуют две существенно различающиеся по физическим, химическим и гидробиологическим свойствам первичные водные массы – речная и морская. В районе этого взаимодействия формируется так называемая устьевая зона смешения. В устьях крупных рек эта зона может занимать обширные площади, например, зона опреснения в

устье Амазонки распространяется в океан на расстояние до 900 км. Строгая теория зоны смешения пока не создана. Авторы статьи, однако, высказали ряд предложений, касающихся структуры и режима этой зоны [6, 8, 14, 21]. Предложено считать внутренней границей устьевой зоны смешения изогалину 1% у дна, а внешней – изогалину в поверхностном слое, значение которой составляет 90% средней солёности вод данного моря. В пределах зоны смешения можно выделить фронтальную подзону (область максимальных продольных градиентов солёности воды), а внутри этой подзоны – вертикальную поверхность – геометрическое место экстремальных продольных градиентов солености воды (фронтальный раздел). Проекция этого раздела на поверхность моря – это гидрофонт. В период половодья на реке, в отливную фазу, при снонах эти границы смешиваются в сторону моря, в период межени, в приливную фазу, при нагонах – в сторону суши (при этом зона смешения может распространяться в русло реки или рукава дельты).

Процесс возрастания солёности воды вдоль зоны смешения от устьевого створа в сторону моря можно объяснить, исходя из закономерностей затухания скорости течения в речной струе на взморье (см. формулу (5)). На боковых и нижней границах речной струи во фрикционное движение вовлекаются смежные морские воды. Вследствие этого расход смешанных речных и морских вод вдоль струи возрастает. На этот парадоксальный факт впервые обратил внимание адмирал О.С. Макаров в своём труде «Витязь и Тихий океан» (1894), написав, что река приводит в движение такое количество морской воды, которое в сто и более раз превосходит сток самой реки.

Согласно расчётам и данным измерений в полевых условиях и в экспериментальных лотках [5, 6], нарастание расхода смешанных вод в сторону водоёма происходит почти зеркально (хотя и медленнее) по сравнению с уменьшением скорости течения (формула (5)). Аналогично возрастает вдоль зоны смешения солёность воды.

**Вертикальное перемешивание вод в устьях рек.** При исследовании стратификации и вертикального перемешивания вод [5–8, 10, 11, 14, 16, 21] авторы статьи придерживались подходов, разработанных для устьев рек в Западной Европе и США [4, 26, 28–30]. В качестве формального показателя степени стратификации и вертикального

перемешивания вод в устьях рек используют так называемый параметр стратификации  $n$ , равный  $\Delta S/S_{\text{ср}}$ , где  $\Delta S = S_{\text{дно}} - S_{\text{пов}}$ ,  $S_{\text{ср}} = 0.5(S_{\text{дно}} + S_{\text{пов}})$ ,  $S_{\text{дно}}$  и  $S_{\text{пов}}$  – солёность воды у дна и на поверхности. Выделяют три основных типа стратификации и перемешивания вод: I. Слабая стратификация и полное (хорошее) перемешивание ( $n$  от 0 до 0,1); II. Умеренная стратификация и частичное перемешивание ( $n$  от 0,1 до 1,0); III. Сильная стратификация ( $n$  от 1,0 до 2,0) и либо клин осолонённых вод у дна, либо тонкий слой пресной воды у поверхности, как во многих фьордах. Согласно [26, 28], на характер вертикального перемешивания заметное влияние оказывают внешние факторы: на ослабление перемешивания (сдвиг его типа к III) влияет увеличение водного стока реки, на активизацию перемешивания (сдвиг в сторону типа I) – усиление воздействия приливов и волнения.

Михайлова в работе [21] на основе опубликованных в зарубежной литературе данных наблюдений за изменением поля солёности в устьях Роны, По, Тибра, Фрейзера, Колумбии в целом подтвердила сделанные ранее выводы и частично уточнила их. В частности, в [21] показано, что при сизигийных приливах вертикальное перемешивание вод сильнее, а стратификация вод слабее, чем в квадратуру.

Помимо параметра  $n$  в качестве показателей процесса смешения вод по вертикали применяют приливный параметр Симмонса  $\alpha = W_Q/P_t$ , где  $W_Q$  – объём стока воды реки за приливный цикл,  $P_t$  – объём приливной призмы, а также ряд гидрофизических критериев. Среди них: плотностное число Фруда

$$F_{1\rho} = V \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{ср}}}} gh, \quad (6)$$

где  $V$  – средняя скорость речного потока,  $h$  – глубина русла,  $\Delta\rho$  – разность плотностей морской  $\rho_m$  и речной  $\rho_p$  воды,  $\rho_{\text{ср}} = 0.5(\rho_m + \rho_p)$ ; эстуарное число Ричардсона; слоеевое число Ричардсона и др. Сводка количественных значений перечисленных показателей, параметров и критерия для разных типов вертикального перемешивания приведены в [5, 6, 8].

**Проникновение морских вод в реки и рукава дельт.** В условиях антропогенного сокращения водного стока многих рек и ускоряющегося повышения уровня океанов и морей актуальным становится исследование процессов проникновения в устья рек осолонённых вод и разработка мер борьбы с этим негативным событием. Михайлова

лова провела анализ этих процессов на примере дельт Яны, Индигирки, Дуная, Тибра, Роны, По, Луары, Меконга, Колвила, Ориноко. При этом использованы два метода анализа и расчёта [16, 21]: 1) эмпирический, заключающийся в построении по данным наблюдений, во-первых, продольных профилей солёности воды в разные фазы водного режима реки и прилива, а во-вторых, графиков зависимости между дальностью проникновения осолонённых вод  $L_S$  и расходом воды реки (рукава)  $L_S = aQ^{-m}$  или  $L_S = b(Q_{kp} - Q)^n$ , где  $Q_{kp}$  – расход воды, при котором начинается проникновение морских вод; 2) полутеоретический, использующий формулу Кейлегана

$$L_S/h = c \text{Fr}_p^{-p}, \quad (7)$$

где  $\text{Fr}_p$  – плотностное число Фруда по формуле (6). Структура формулы (7) указывает на то, что дальность проникновения осолонённых вод в устья рек должна увеличиваться при уменьшении скорости течения в речном потоке и увеличении глубины как в результате искусственного углубления русла или устьевого бара, так и повышения уровня моря. Значения эмпирических параметров во всех приведённых выше формулах подбираются по данным наблюдений. В [21] приведены сведения о величинах  $L_S$  и  $Q_{kp}$  в устьях ряда отечественных и зарубежных рек.

### Морфологические процессы

**Процессы дельтоформирования.** В последние десятилетия в нашей стране в изучении процессов формирования речных дельт получены существенные результаты [2, 3, 5–9, 13–20, 22–24]; в этих исследованиях активное участие принимали и авторы статьи. Ими получены следующие основные результаты:

1. Предложено подразделение процессов дельтоформирования на части, отличающиеся характером процесса и его продолжительностью: эпохи дельтоформирования, соответствующие крупным морским регрессиям, завершающим этапам трангрессий и периодам относительной стабилизации уровня морей; стадии формирования сначала дельты выполнения, а затем дельты выдвижения в периоды замедления повышения уровня моря и его стабилизации; фазы малорукавной, многорукавной и вновь малорукавной дельты во время обеих стадий [6, 8, 14]. Выделены также два типа дельтоформирования: медленного эволюционного, заключающегося в чередующемся выдвижении в море крупных дельтовых лопастей (как в

дельтах Волги, Лены, По, Роны и др.) и быстрого, скачкообразного, с прорывами и полной перестройкой гидрографической сети дельты. Процессы второго типа включают несколько этапов [6, 8, 17, 19, 23, 24]. Такие процессы до антропогенного сокращения стока наносов рек происходили в очень изменчивых дельтах Амудары, Или, Курьи, Сулака [9, 23, 24], а также Хуанхэ, Миссисипи, Годавари. В настоящее время развитие дельты с прорывами может случиться только в устье Терека [23].

2. Михайловой выявлены особенности морфометрии дельт выполнения и выдвижения [19, 20], заключающиеся в различиях связей между разными характеристиками дельт обоих типов. В [20] приведена сводка морфометрических характеристик 16 дельт выполнения и 42 дельт выдвижения в устьях рек России и зарубежных стран. В [19] опубликованы сведения о многолетних изменениях многих дельт выдвижения.

3. Разработан балансовый подход в изучении изменений дельт выдвижения [6, 18]. Предложено, в частности, приближённое уравнение баланса наносов в объёмных единицах за интервал времени  $\Delta t$  (в годах) в условиях относительно стабильного уровня моря

$$\Delta V_{\text{кв}} = \Delta L_d h_{\text{взм}} B_{\text{МКД}} = k W_R \Delta t / \rho_{\text{отл}} - V_b, \quad (8)$$

где  $\Delta V_{\text{кв}}$ ,  $\Delta L_d$  – изменения объёма устьевого конуса выноса и длины дельты за период  $\Delta t$ ,  $h_{\text{взм}}$  – глубина взморья,  $B_{\text{МКД}}$  – длина МКД,  $W_R$  – сток наносов реки в млн т/год,  $\rho_{\text{отл}}$  – плотность дельтовых отложений,  $k$  – доля дельтоформирующих наносов в величине  $W_R$  (обычно от 0,3 до 0,5),  $V_b$  – объём наносов, уносимых волнением за пределы устья реки.

На основе рассматриваемого подхода и уравнения (8) разработан приближённый метод расчета «критического» стока наносов реки  $W_{R, \text{кр}}$ , при котором дельта перестаёт выдвигаться в море и тенденция ее развития сменяется на отступание и деградацию. Из компонентов уравнения (8) измерить можно лишь морфометрические характеристики и величину  $W_R$ . Поэтому выражение (8) необходимо привести к эмпирической формуле, рассчитываемой аналитически или графически для каждой конкретной дельты  $\Delta L_d / \Delta t = a W_R - b$ , откуда при условии  $\Delta L_d / \Delta t = 0$  можно рассчитать «критическое» значение  $W_R = b/a$ . Метод применён авторами к дельтам Нила, Годавари, Дуная и Хуанхэ. Для первых двух сток наносов рек стал меньше «критичес-

кого» ещё в середине 20 в. после сооружения на реках крупных водохранилищ, а для двух последних – антропогенное уменьшение  $W_R$  и выход дельт на большие морские глубины приблизил их к началу размыва и деградации.

4. Разработан метод оценки степени затопления дельты при значительном повышении уровня моря и антропогенном сокращении стока наносов реки [14, 16, 18]. Метод основан на предложенной Михайловой [18] концепции подпорной призмы, возникающей в приморской зоне дельты в результате повышения уровня моря на  $\Delta H_m$ . Объём этой призмы равен

$$V_{пп} = 0,5 \Delta H_m^2 B_{мкд} / i_d, \quad (9)$$

где  $i_d$  – уклон поверхности приморской зоны дельты. Степень затопления дельты будет зависеть от соотношения объёмов  $V_{пп}$  и стока дельтоформирующих наносов  $\Sigma k W_R / \rho_{отд}$  за период подъёма уровня моря. Если  $V_{пп}$  больше стока наносов, то часть дельты (как в устьях Урала, Сулака, Куры в период повышения уровня Каспийского моря на 2,35 м в 1978–95 гг.) будет затоплена, а площадь всей дельты уменьшится [23]. Если же сток наносов больше  $V_{пп}$ , то дельта будет наращиваться в высоту и медленно выдвигаться в море, несмотря на рост его уровня (как в устье рукава Каргалинский Прорыв в дельте Терека [23]).

**Русловые процессы в рукавах дельт.** С целью изучения русловых процессов и динамики изменчивой русловой сети дельт авторы [6, 16] разработали концепцию динамически устойчивого русла рукавов дельт. Суть концепции состоит в следующем. Предполагается, что в результате взаимного приспособления потока и русла эрозионно-аккумулятивные процессы стремятся сформировать динамически устойчивое русло, в котором направленные (необратимые) деформации не происходят, а возможны лишь знакопеременные (обратимые) изменения (например смешение донных гряд). На основе обработки обширного материала измерений в неприливных дельтах Енисея, Печоры, Оби, Лены, Волги, Дуная, Кубани, Куры, Терека, Амударии получены связи вида

$$B_0 = K_B Q_\phi^{1/2}, h_0 = K_h Q_\phi^{1/3}, V_0 = K_V Q_\phi^{1/6}, I_0 = K_I Q_\phi^{-1/6}, \quad (10)$$

где  $B_0$ ,  $h_0$ ,  $V_0$  и  $I_0$  – мало изменяющиеся, т.е. условно устойчивые величины ширины, средней глубины русла, средней скорости течения,

уклона водной поверхности рукавов при руслоформирующих расходах воды в рукавах  $Q_\phi$ , соответствующих среднему максимальному расходу воды реки в вершине дельты в период половодья. Структура формул (10) получена теоретически, а коэффициенты  $K$  найдены путём обработки данных измерений и оказались индивидуальными для каждой из упомянутых дельт и зависящими от концентрации наносов в реке в период половодья (чем она больше, тем  $K_B$  и  $K_h$  меньше, а  $K_V$  и  $K_I$  – больше [6].

Формулы (10) названы гидролого-морфометрическими зависимостями; они были применены авторами для оценки тенденции развития рукавов в конкретных дельтах. Эта оценка строилась на сравнении фактических характеристик рукавов  $B$ ,  $h$ ,  $V$  и  $I$  с их устойчивыми значениями согласно формулам (10). Признаками тенденции рукава как активизации (размыву) служат соотношения  $B < B_0$ ,  $h < h_0$ ,  $B/h < B_0/h_0$ ,  $V > V_0$  и  $I > I_0$ ; соотношения с противоположными знаками – признаки потери рукавом активности и тенденции к заилиению и отмиранию [6, 16].

Авторами статьи [6, 14, 16, 18, 23] предложены четырёхтиповые схемы (рис. 2) русловых деформаций в отдельных дельтовых рукавах при неизменном уровне моря, при его повышении и при его понижении в условиях как приглубого, так и очень отмелого взморья.

Русловые процессы в многорукавных системах дельт значительно сложнее. В таких случаях приходится рассматривать не только изменения морфометрических характеристик рукавов, но и сопутствующее им перераспределение стока по рукавам. Наиболее частый случай следующий: стремясь к достижению устойчивого состояния, русло с увеличивающимся расходом воды начинает размываться. Это ведёт к уменьшению его гидравлического сопротивления и дальнейшему увеличению расхода воды. Смежный рукав, наоборот, теряет свой сток и начинает заиливаться. В результате начавший активизироваться рукав продолжает размываться, а уменьшивший свой сток – заиливаться. Этот процесс продолжается до полного переключения стока в первый рукав и отмирания второго. Интенсивность этого процесса тем больше, чем больше сток наносов реки. Согласно сказанному, многорукавные системы в дельтах, особенно активно развивающихся, обычно недолговечны. В очень редких слу-

чаях возможно временное («конкурирующее») развитие смежных рукавов.

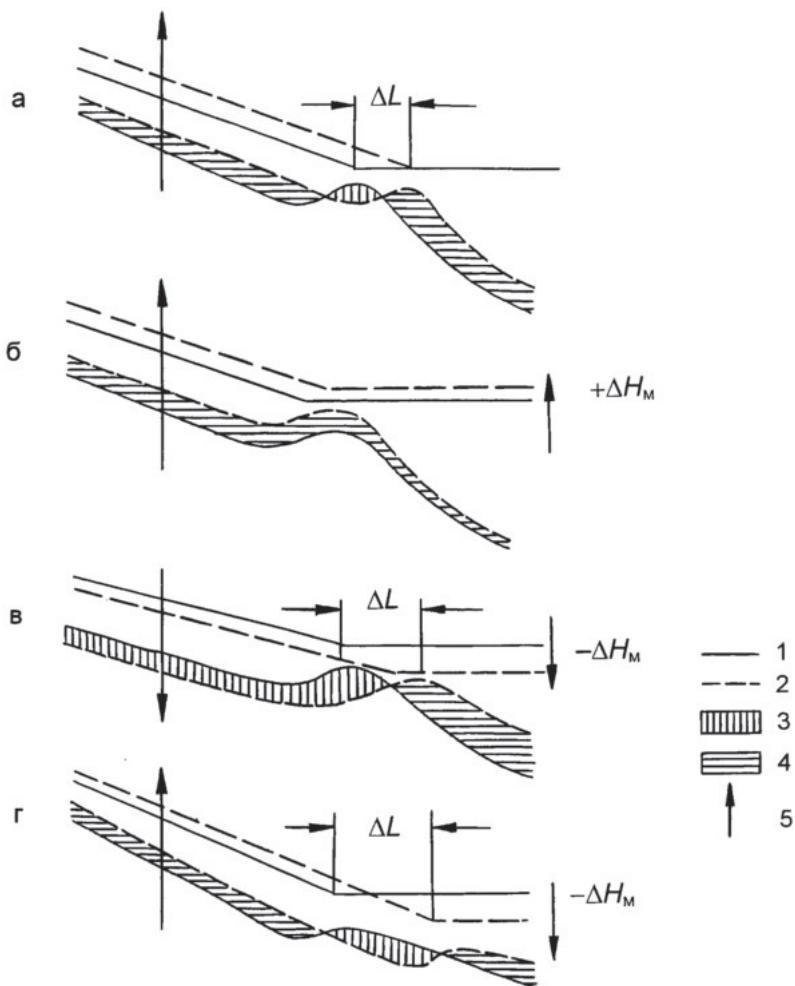


Рис. 2. Схема необратимых русловых деформаций в рукавах дельты в результате: устьевого удлинения при стабильном уровне моря (а), повышения уровня моря (б), понижения уровня моря в случае приглубого взморья (в), понижения уровня моря в случае очень отмелого взморья (г). 1 и 2 – начальное и конечное положение уровенной поверхности и дна, 3 – размыв, 4 – аккумуляция наносов, 5 – направленность изменения уровня воды и отметок дна,  $\Delta L$  – величина устьевого удлинения русла

## **Заключение: современные проблемы и задачи гидрологии устьев рек**

В последние полвека гидрология устьев рек как наука добилась крупных научных и практических результатов; в Европе и США – в основном при изучении эстуариев, в нашей стране – дельт. Несмотря на эти достижения, требования к гидрологии устьев рек возрастают. Объясняется это тем, что 1) устья рек, особенно в современных условиях, – одни из самых изменчивых и экологически уязвимых географических объектов; 2) хозяйственное освоение их богатых природных ресурсов постоянно расширяется, что нуждается в его научном обосновании. Кроме того, требует решения ряд проблем, возникающих при одновременном использовании водных, земельных, биологических и других ресурсов устья реки разными отраслями хозяйства. К таким проблемам относятся, например, противоречия между водным транспортом, коммунальным хозяйством, нефтегазовым комплексом, с одной стороны, и требованиями охраны природы, с другой; между сельским и рыбным хозяйством; между потребностями сельского хозяйства в многоводный период (защита от наводнений) и во время засухи (необходимость в большом водозаборе для орошения земель).

К наиболее актуальным задачам современной гидрологии устьев рек следует отнести следующие:

1. Разработка прогноза возможных в 21 в. изменений строения, режима и экологических условий устьев рек под воздействием ожидаемых естественных и антропогенных изменений стока воды и наносов рек и повышения уровня Мирового океана и связанных с ним морей. Одной из наиболее важных задач становится прогноз затопления и деградации дельт в результате повышения уровня моря и антропогенного сокращения стока наносов рек.

2. Разработка комплекса усовершенствованных методов анализа, расчёта и прогноза гидрологических характеристик устьев рек. Важной частью такого комплекса методов должна стать гидролого-морфологическая математическая модель развития русловой сети дельты, одновременно учитывающая взаимовлияющие русловые процессы в рукавах и перераспределение стока между ними.

3. Исследование воздействия на устья рек опасных гидрологических событий (в частности, наводнений как речного, так и морского происхождения).

4. Разработка комплекса универсальных научных рекомендаций по рациональному использованию и охране природных ресурсов устьев рек. В частности, должны быть разработаны рекомендации по преодолению противоречий в требованиях различных отраслей хозяйства. Одним из возможных компромиссов может стать принцип «зонирования» устьев рек, т.е. разделение их площади под нужды разных потребителей.

При дальнейшем изучении устьев рек России (помимо решения перечисленных выше общенаучных задач) необходимо уделить особое внимание следующему: 1) более широкому внедрению постоянно действующего мониторинга гидрологического и экологического состояния устьев важнейших рек страны с применением усовершенствованных приборов и наземных и дистанционных методов; 2) расширению исследований в устьях рек Российской Арктики, в первую очередь их ледового режима, в связи с потеплением климата; 3) дальнейшему изучению изменения строения и режима устьев рек, впадающих в Каспийское море в условиях начавшегося в конце 20 в. нового понижения его уровня; 4) изучению ещё недостаточно исследованных приливных эстуариев в устьях рек страны, в особенности на примере эстуариев на Камчатке и в Приморье.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дельты – модели для изучения / Пер. с англ. под ред. Р.Б. Сейфуль-Мулюкова. М.: Недра, 1971. 323 с.
2. Коротаев В.Н. Очерки по геоморфологии устьевых и береговых систем. Избранные труды. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 493 с.
3. Кравцова В.И., Митъкиных Н.С. Устья рек России. Атлас космических снимков / Под ред. В.Н. Михайлова. М.: Научный мир, 2013. 122 с.
4. Мак-Доузлл Д.М., О'Коннор Б.А. Гидравлика приливных устьев рек / Пер. с англ. // под ред. В.Н. Михайлова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
5. Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 175 с.
6. Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. Учебник. М.: Изд-во Московского ун-та, 1998. 176 с.

7. Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в неприливных устьях рек. М.: Гидрометеоиздат, 1971. 259 с.
8. Михайлов В.Н. Закономерности устьевых процессов // Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. С. 609–686.
9. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
10. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. Том 39, №3, 2012. С. 243–257.
11. Михайлов В.Н., Горин С.Л., Михайлова М.В. Новый подход к определению и типизации эстуариев // Вестник Московского университета. Серия 5: География. №5, 2009. С. 3–11.
12. Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология. Учебник. М.: Директ-Медиа, 2017. 751 с.
13. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние местных водохозяйственных и гидротехнических мероприятий на речные дельты // Водные ресурсы. Том 42, №3, 2015. С. 249–259.
14. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Влияние многолетних изменений морских факторов на устья рек // Водные ресурсы. Том 42, №4, 2015. С. 367–379.
15. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Дельты как индикаторы естественных и антропогенных изменений режима рек и морей // Водные ресурсы. Том 30, №6, 2003. С. 655–666.
16. Михайлов В.Н., Михайлова М.В. Физические основы гидрологических и морфологических процессов в речных дельтах // Вестник РГФИ. №2 (78), 2013. С. 26–33.
17. Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 280 с.
18. Михайлова М.В. Баланс наносов в устьях рек и формирование дельт при повышении и понижении уровня моря // Водные ресурсы. Том 33, №5, 2006. С. 567–579.
19. Михайлова М.В. Многолетние изменения строения речных дельт // Водные ресурсы. Том 43, №5, 2016. С. 488–501.
20. Михайлова М.В. Морфометрия речных дельт // Водные ресурсы. Том 42, №1, 2015. С. 45–55.
21. Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Водные ресурсы. Том 40, №5, 2013. С. 439–455.
22. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптуров Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчёта (прогноза). СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 383 с.
23. Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления / Под ред. В.Н. Михайлова. М.: ГЕОС, 2013. 702 с.

24. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития / Под ред. В. Н. Коротаева, В.Н. Михайлова, Д.Б. Бабича, Ц. Ли, Ш. Лю. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.
25. Coleman J.M, Huh O.K. Major world deltas. A perspective from space <http://www.geol.lsu.edu/WDD/PUBLICATIONS/C&Hnasa04/C&Hfinal04.htm>
26. Dyer K.R. Estuaries. A physical introduction. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 195 p.
27. Geomorphology and sedimentology of estuaries // Ed. by G.M.E. Perillo. Amsterdam: Elsevier Science BV, 1996. 471 p.
28. Officer Ch.B. Physical oceanography of estuaries (and associated coastal waters). New York: John Wiley and Sons, Inc., 1976. 465 p.
29. Prandle D. Estuaries: Dynamics, mixing, sedimentation and morphology. New York: Cambridge University Press, 2009. 238 p.
30. Savenije H.H. Salinity and tides in alluvial estuaries. Amsterdam: Elsevier, 2005. 197 p.
31. Syvitski P.M., Kettner A.J., Overeem I., Hutton E.W.H. Hannon M.T., Brakenridge G.R., Day J., Vörösmarty C.J., Saito Y., Giosan L., Nicholls R.J. Sinking deltas // [http://darchive.mblwholibrary.org/bitstream/handle/1912/3207/SyvitskiDeltas\\_Paper.pdf?sequence=1](http://darchive.mblwholibrary.org/bitstream/handle/1912/3207/SyvitskiDeltas_Paper.pdf?sequence=1)
32. Wright L.D. River deltas // Coastal Sedimentary Environments // Ed by R.A. Davis Jr. New York, Springer-Verlag, 1978. P. 5–68.

# **Использование данных дистанционного зондирования для гидрологических исследований в ИВП РАН: ретроспектива и современные достижения**

*Е.Л. Музылёв, И.Е. Курбатова*

## **Развитие исследований с начала 1970-х до 1990-х годов<sup>1</sup>**

Впервые в отечественной практике концептуальные положения по использованию данных космической съёмки для расчётов и прогнозов речного стока были сформулированы в работе Г.П. Калинина [7], выполненной им в Институте водных проблем АН СССР. Автором были намечены пути решения задач по использованию этих данных для анализа гидрологических процессов, в том числе формирования стока, очерчены перспективы такого использования, отмечены отображавшиеся на снимках особенности подстилающей поверхности, количественные характеристики которых могли бы использоваться в прогностических моделях. Предложенные Калининым подходы были реализованы в ИВП АН СССР Ю.В. Куриловой и П.А. Колосовым [8] при оценках характеристик речного стока с использованием спутниковых данных о динамике снеготаяния.

С конца 1970-х и в 1980-е гг. в ИВП АН СССР начались широкие исследования возможностей использования данных дистанционного зондирования для решения различных задач гидрологии и гидрогеологии. В ходе этих исследований специалистами соответствующих подразделений Института был накоплен опыт дешифрования и интерпретации спутниковой информации, сформированы наборы дешифровочных признаков для идентификации природных, в первую очередь водных, объектов и выявления их динамики, а также определения степени антропогенной нагрузки на природную среду и оценки геоэкологического состояния изучаемых территорий. Так, Р.Г. Джамаловым и Ю.Л. Объедковым была разработана методика гидрогеологического дешифрования космоснимков, с помощью которой были установлены региональные закономерности подземного стока отдельных территорий, определено влияние тектонических и неотектонических структур на подземный сток в моря и крупные озера [см., например, 6]. Объедковым были определены критерии поиска пресных подземных вод в аридных зонах [34]

<sup>1</sup> При составлении обзора исследований по спутниковой тематике, проводившихся в Институте в 1970–90-е гг., авторы использовали материалы статьи Ю.Л. Объедкова [37]

и выявления термальных вод в сейсмоактивных районах [35], разработаны методические приёмы по составлению карт водообеспеченности и структуры землепользования в межгорных впадинах и речных долинах, а также карт геоэкологического районирования территории в зависимости от степени антропогенного воздействия на среду и характера взаимодействия литологического состава пород с грунтовыми водами [36]. Новые подходы к моделированию процессов формирования стока горных рек с использованием спутниковых данных о динамике снежного покрова в их бассейнах разработаны Е.Л. Музылёвым. Им была разработана модель формирования стока горной реки с использованием данных о покрытости водосбора снегом [27]. Исследования устьевых областей рек и береговой зоны Каспийского моря в их динамике проводились Г.Ф. Красножоном и его группой [см., например, 10]. Исследования состояния прибрежных зон внутренних морей проводились группой исследователей с участием И.Е. Курбатовой [1, 2]. Исследования динамики природных экосистем дельт рек аридных районов под влиянием антропогенного изменения речного стока и их картографирование с использованием спутниковых данных проводились Н.М. Новиковой [33]. В.П. Салтанкиным были оценены возможности использования аэрокосмической информации для комплексного исследования водохранилищ (в 1974–76 гг. – нескольких среднеазиатских, а в последующие годы – в основном волжских, в т.ч. входящих в систему водоснабжения г. Москвы) [84, 87].

В конце 1978 г. в ИВП АН СССР была проведена Международная школа-семинар по использованию дистанционных методов в гидрологии, в работе которой участвовали специалисты СССР, Чехословакии, Польши, Болгарии, ГДР. В 1979 г. Институт водных проблем входил в число организаторов Международного семинара социалистических стран по дистанционному зондированию Земли из космоса «Исследование водных ресурсов и их загрязнения», проводившегося на Валдайской научной станции ГГИ.

По линии Совета «Интеркосмос» АН СССР специалисты Института участвовали в ряде международных экспериментов, проводившихся с целью исследования различных природных процессов при использовании аэрокосмической информации: «Тропик-1, -2, -3», «Гоби-Хангай-81», FIFE (Канзас, США), КурЭкс и других.

Результаты проводившихся специалистами Института экспериментальных и полевых исследований представлены в статьях и монографиях тех лет (см. библиографию в [37]).

### **Результаты современных исследований**

Наличие описанной качественной спутниковой информации и накопленный специалистами Института в предшествующие годы опыт использования этой информации при решении гидрологических и геоэкологических задач позволили сформировать к концу 1990-х – началу 2000-х гг. два направления исследований, успешно развивающихся до настоящего времени: математическое моделирование гидрологических процессов и геоэкологический мониторинг состояния водных объектов и их водосборов.

#### **Использование спутниковых данных при моделировании гидрологических процессов**

Работы по моделированию гидрологических процессов с использованием спутниковых данных, проводившиеся в лаборатории гидрологического цикла ИВП РАН (рук. д.ф.-м.н. Л.С. Кучмент), включали разработку двух физико-математических моделей: формирования талого стока на речных водосборах и формирования водного и теплового режимов различных по размерам территорий.

#### **Использование спутниковых данных при моделировании процессов формирования талого стока**

В настоящем подразделе представлены результаты исследований, описанные в работах [24, 26, 44].

Использовавшаяся физико-математическая модель формирования снежного покрова и снеготаяния описывает динамику высоты снежного покрова и его плотности с учётом влияния растительности в течение периодов снегонакопления и снеготаяния [43]. Входными переменными модели являются данные стандартных срочных наблюдений на метеорологической сети и данные снегомерной съёмки, проводившейся на станциях, находящихся в исследуемых бассейнах рек Вятки и Дона. По этим данным производилась калибровка модели. Для построения полей непрерывных во времени оценок характеристик снежного покрова в модель, помимо наземных, вводились данные о покрытии территории снегом (ПТС) и температуре его поверхности, полученные по измерениям радиометра

MODIS(ИСЗEOSTerra)иоценкизапасовводыснега(SWE,SnowWaterEquivalent) скартAEDySno, разработанных при использовании данных микроволнового радиометраAMSR-E(ИСЗEOSAqua)[26]. В модели также использовалась информация с карт типов подстилающей поверхности, а также видов и густоты лесной растительности, построенных поданным радиометраAVHRR(ИСЗNOAA). Рассчитанные по модели значения ПТС для нескольких метеостанций сравнивались с данными MODIS, а значения SWE – соценками карт AEDySno. Показано[26], что результаты расчётов ПТС при малой залесенности водосбора практически совпадают со спутниковыми оценками, а при большой – могут существенно различаться. Поля рассчитанных по модели значений SWE отличаются от построенных по данным AMSR-E, причём несовпадения заметно проявляются в период снеготаяния. Скорее всего, это может происходить вследствие падения точности радиометрических измерений в данный период при зондировании толщи снега, напитанного водой [42].

Расчёты гидрографов талого стока исследуемых рек производились с помощью модели формирования стока [44]. Модель содержит описания процессов вертикального влагопереноса в промерзающей и оттаивающей почве и впитывания воды в мёрзлую почву, а также вертикального влагопереноса в незамёрзшей почве, испарения, задержания воды в бессточных микродепрессиях рельефа, поверхностного и подповерхностного склонового стекания воды и её движения по русской сети. Для обоих водосборов получилось неплохое совпадение рассчитанного и фактического гидрографов. Более близкими к фактическим оказались гидрографы, рассчитанные по модели снежного покрова, чем вычисленные по данным, снятым с карт AE DySno.

Таким образом, использование значений SWE, определённых по данным AMSR-E, при моделировании стока может быть эффективно для интервалов времени, предшествующих началу снеготаяния. В то же время привлечение спутниковых оценок ПТС в периоды «пятнистого» залегания снега повышает точность оценки объемов поступающей на водосбор воды, что позитивно сказывается на качестве прогнозов стока.

## **Использование спутниковых данных при моделировании формирования водного и теплового режимов обширных территорий**

Разрабатываемая в ИВП РАН модель формирования водного и теплового режимов обширных территорий относится к семейству физико-математических моделей вертикального влаго- и теплообмена подстилающей поверхности (ПП) с атмосферой (LS-модели, Land Surface Models, LSM). В первоначальной версии модели, разработанной в Институте и содержащей основные уравнения, описывавшие процессы влаго- и теплообмена [25], привлечение спутниковых данных не предполагалось, калибровка модели производилась по данным наблюдений на агрометеорологических станциях. Первой характеристикой, оценки которой, полученные по данным измерений со спутников, использовались в LSM, была температура подстилающей поверхности  $LST$  (Land Surface Temperature), и для её определения специалистами НИЦ «Планета» под руководством д. ф.-м. н. А. Б. Успенского был разработан специальный метод [94]. По мере запуска новых спутников и, соответственно, появления новой аппаратуры, расширялся спектр характеристик ПП и метеорологических характеристик, оценки которых могли быть построены по данным измерений этой аппаратурой с последующим использованием в модели. На сегодняшний день таких характеристик восемь: проектное покрытие растительностью  $B$ , листовой индекс  $LAI$ , нормализованный индекс вегетации  $NDVI$ , излучательная способность ПП  $E$ , количество осадков,  $LST$  трёх видов: температуры поверхности почвы  $T_{sg}$  и воздуха у поверхности растительного покрова  $T_a$ , принимаемая за температуру растительности, температура подстилающей поверхности  $T_s$ ,  $eff$  (эффективная) и  $T_{ls}$ . Оценки этих характеристик строятся по результатам тематической обработки данных измерений сканирующих радиометров AVHRR (ИСЗ NOAA), MODIS (ИСЗ EOS Terra и Aqua), SEVIRI (геостационарные ИСЗ Meteosat-9, -10) и МСУ-МР (ИСЗ Метеор-М № 2). Кроме того, поданным скаттерометра ASCAT (ИСЗ MetOp-A, -B) определяется влажность поверхности почвы.

Исследования проводились на примере находящейся в лесостепной зоне РФ части сельскохозяйственного Центрально-Чернозёмно-горного региона (ЦЧР) площадью 227,3 тыс. км<sup>2</sup>, включающей Курскую, Бел-

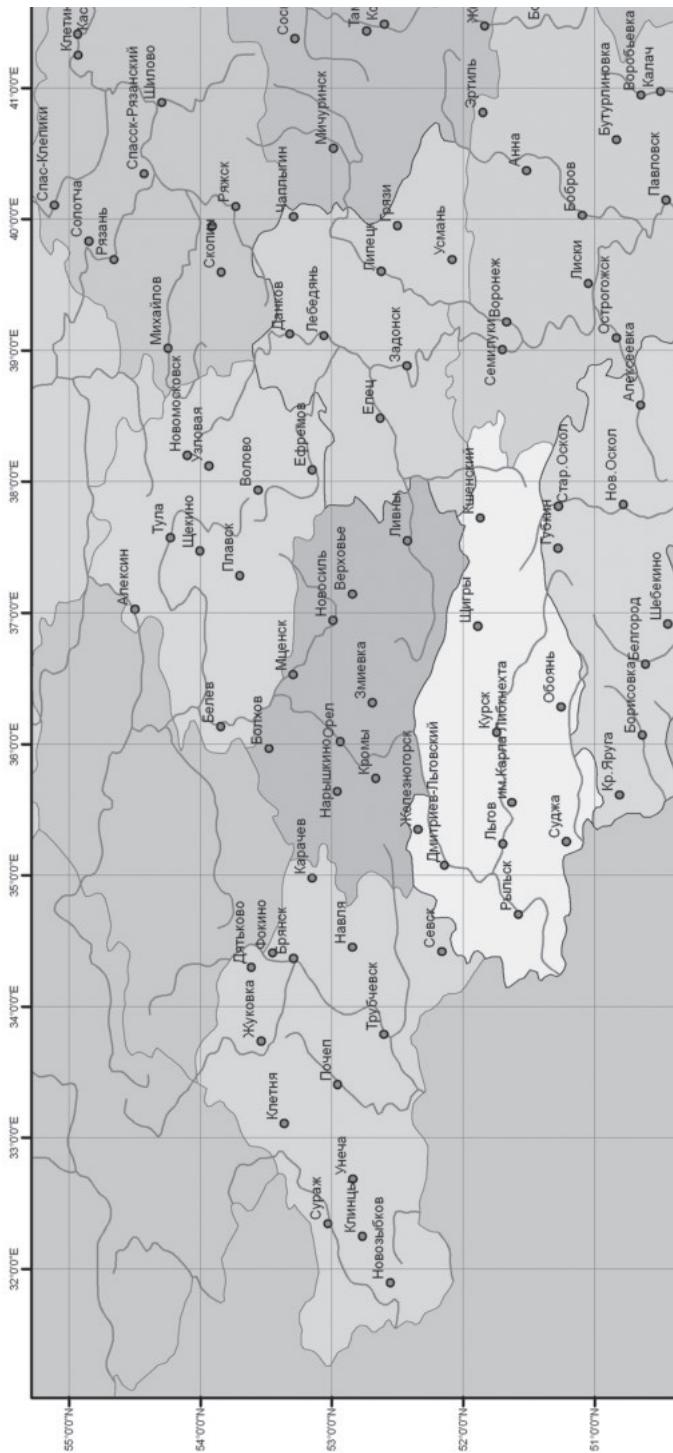


Рис. 1. Схема района исследований – участка территории Центрально-Чернозёмного района Европейской части РФ площадью 227,3 тыс. км<sup>2</sup>

городскую, Орловскую, Воронежскую, Липецкую, Тамбовскую и Брянскую области (рис. 1).

База наземных данных, использовавшихся при исследованиях, содержит результаты стандартных срочных трёхчасовых измерений метеорологических характеристик, а также ежедекадных измерений влажности и температуры почвы под различными культурами за сезон вегетации на 48 находящихся в регионе агрометеорологических станциях. Также на нескольких станциях производились изменения испарения с помощью испарителей. Расчёты характеристик водного и теплового режимов упомянутого участка территории ЦЧР с помощью адаптированной к спутниковым данным LSM производились для сезонов вегетации 2009–16 гг. Для сезонов 1997–2008 гг. аналогичные расчёты проводились для части водосбора р. Сейм (Курская область) площадью 7460 км<sup>2</sup>.

#### **Краткое описание LSM и методов оценки характеристик подстилающей поверхности и метеорологических характеристик по данным ИСЗ**

Разработанная модель вертикального влаго- и теплопереноса в системе «почва-растительность-атмосфера» для вегетационного периода предназначена для расчёта влагозапасов  $W$  деятельного слоя почвы и его теплосодержания, испарения с голой почвы и транспирации влаги растительностью (суммарного испарения  $Ev$ ), вертикальных потоков скрытого и явного тепла с ПП, воспроизведения распределений влажности и температуры почвы по глубине в их динамике, оценки температуры поверхностей почвы  $T_g$  и растительного покрова  $T_f$ , а также радиационной LST  $T_s$ . Процессы вертикального тепло- и влагопереноса описываются в модели системой уравнений в частных производных, записанных для 2-х слоёв: переменного по высоте слоя растительности и постоянного по глубине слоя почвы. Детальное описание модели и результаты её калибровки и верификации приведены во многих наших работах [см., например, 29].

Различия свойств ПП и метеоусловий учитываются в модели путём представления характеристик почв и растительности в качестве параметров, а метеорологических характеристик – в качестве входных переменных при определении значений большинства из этих величин по данным измерений на агрометеорологических

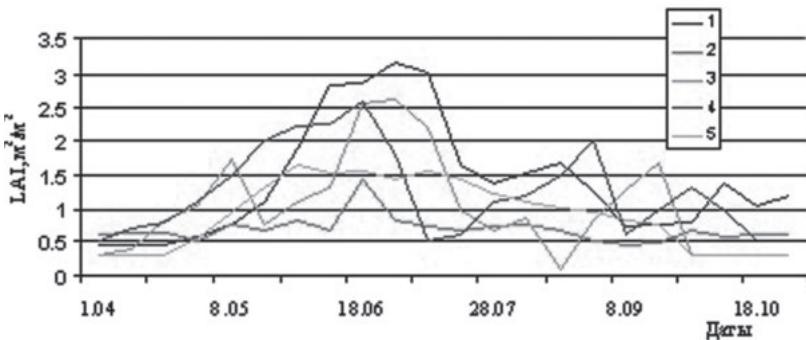


Рис. 2. Временные ходы LAI за период вегетации 2012 г. для агрометеорологической станции Белгород, построенные по данным AVHRR для зерновых (1) и трав (2), данным MODIS (3), наземным данным (4) и данным SEVIRI (5)

станциях и спутниковой информации. К числу последних относятся  $LAI$ ,  $B$ ,  $NDVI$ ,  $E$ , 3 вида  $LST$  и осадки. Значения характеристик почв были получены при использовании базы данных HWSD(Harmonized World Soil Database). Адаптация модели к перечисленным спутниковым оценкам производилась путём перехода к вычислительной сетке размером 3x3 пикселя(элемента разрешения) ИК каналов AVHRR( $\sim 745$  км $^2$ ), накладывавшейся на карту региона. Также в узлах сетки определялись значения параметров и входных переменных модели и производились вычисления влагозапасов почвы, суммарного испарения и

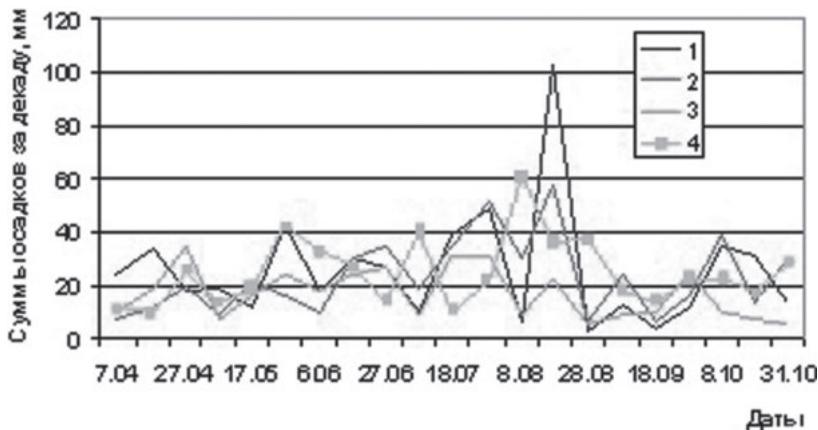


Рис. 3. Сумма осадков за декаду на агрометеорологической станции Дмитриев-Орловский для сезона вегетации 2016 г.: измеренные (1) и определённые по данным радиометров SEVIRI (2), MCSU-MP (3) и AVHRR (4).

других характеристик водного и теплового режимов исследуемой территории, а также температур  $T_f$ ,  $T_g$  и  $T_s$ .

Оценки названных характеристик поданным AVHRR/NOAA, MODIS/Terra/Aqua, SEVIRI/Meteosat-9, -10 и МСУ-МР/Метеор-М №2 были получены специалистами НПО «Планета» под руководством д. ф.-м. н. А. Б. Успенского с помощью разработанных ими технологий тематической обработки, описанных в работах [40, 3, 4]. Все технологии были адаптированы к территории ЦЧР. В указанных работах приведены оценки точности определения используемых характеристик ПП по сравнению с имеющимися данными наблюдений на наземной сети мониторинга. В качестве примеров на рис. 2 сравнивается временной ход  $LAI$  за сезон вегетации, построенный по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI и по наземным данным для нескольких агрометеорологических станций региона, а на рис. 3 приведён временной ход сумм осадков за декаду для сезона вегетации 2016 г., измеренных на агрометеорологической станции Дмитриев-Орловский и определённых по данным SEVIRI, AVHRR и МСУ-МР.

### **Использование спутниковых оценок характеристик растительности и метеорологических характеристик при расчёте влагосодержания почвы и суммарного испарения**

Основные результаты исследований, представленные ниже, подробно описаны в наших работах [28, 29, 30, 31, 45].

Спутниковые оценки характеристик растительности, LST и осадков использовались в LSM с учётом их распределений по площади исследуемой территории при реализации следующих процедур:

замены определённых по данным наземных наблюдений значений параметров модели  $LAI$  и  $B$  на их оценки по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI и МСУ-МР;

ввода в модель в качестве входных переменных значений  $T_{s,eff}$ ,  $T_{ls}$  и  $T_a$ , определённых поданным AVHRR, MODIS, SEVIRI и МСУ-МР, вместо их расчётных оценок по наземным данным;

ввода в модель также в качестве входных переменных величин осадков за сутки и по срокам, рассчитанных поданным AVHRR, SEVIRI и МСУ-МР, вместо результатов их измерений на агрометеорологических станциях региона;

учёта в модели пространственной неоднородности полей оценок  $LAI$ ,  $B$ ,  $T_{s,eff}$ ,  $T_{ls}$ ,  $T_a$  и осадков, построенных по спутниковым данным

AVHRR, MODIS, SEVIRI и MCY-MP и оценок осадков, температуры и влажности воздуха, являющихся результатом интерполяции данных стандартных наземных наблюдений, путём создания алгоритмов и программ ввода в модель значений всех указанных величин в каждом узле её вычислительной сетки.

Все упомянутые процедуры замены данных наземных наблюдений на оценки по данным AVHRR, MODIS и SEVIRI были успешно реализованы для сезонов вегетации 2009–16 гг., а на оценки по данным MCY-MP – для сезонов вегетации 2015–16 гг. (после начала регулярного приёма данных с Метеора-М №2).

Возможность использования первой процедуры была подтверждена путём сравнения временных ходов за сезон вегетации: 1) величин  $LAI$ , определенных по данным AVHRR, MODIS, SEVIRI, MCY-MP и по наземным данным для нескольких агрометеорологических станций, и 2) фактических влагозапасов почвы  $W$  и суммарного испарения  $Ev$  и их значений, рассчитанных по модели при оценке  $LAI$  по данным названных сенсоров и наземных измерений. Работоспособность второй процедуры была проверена сопоставлением рассчитанных по модели значений  $LST$   $T_s$  и поверхности растительного покрова  $T_f$  с их спутниковыми аналогами  $T_{s,eff}$ ,  $T_{ls}$  и  $T_a$  и данными наземных наблюдений, а также сравнением временных ходов за сезон вегетации величин  $W$  и  $Ev$ , измеренных на агрометеорологических станциях и рассчитанных при использовании спутниковых оценок  $LST$  в качестве входных переменных. Первым действием при реализации процедуры ассилияции в модели спутниковых оценок осадков является проверка точности этих оценок на каждом временном расчётом шаге, включающая сравнение площадных распределений полей осадков (их трехчасовых, суточных и месячных сумм), построенных по данным AVHRR, SEVIRI и MCY-MP, а также путём интерполяции данных сетевых наземных наблюдений.

Расчёты характеристик водного и теплового режимов исследуемого региона при использовании спутниковых оценок осадков в качестве входной переменной модели были проведены для сезонов вегетации 2009–16 гг. На рис. 4 представлены результаты моделирования влагозапасов почвы  $W$  и суммарного испарения  $Ev$  за сезон вегетации 2016 г. для одной из агрометеорологических станций региона при использовании в расчётах величин осадков, определявших-

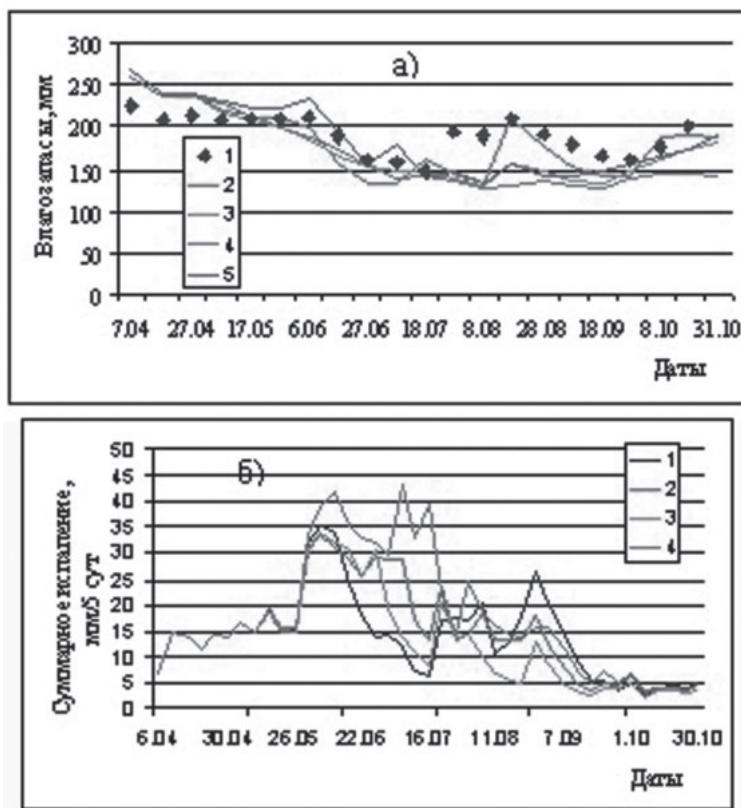


Рис. 4. Влагозапасы метрового слоя почвы  $W$  (а) и суммарное испарение  $E_v$  (б) на агрометеорологической станции Готня для сезона вегетации 2016 г. Слева: значения  $W$  измеренные (1) и рассчитанные по модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (2), SEVIRI (3), MCY-MP (4) и AVHRR (5). Справа: значения  $E_v$  рассчитанные по модели при оценке осадков по данным наземных наблюдений (1), SEVIRI (2), MCY-MP (3) и AVHRR (4).

ся по данным радиометров AVHRR, SEVIRI, MCY-MP и по данным наземных наблюдений. Эти результаты показывают, что расхождения значений  $W$  и  $E_v$  находятся в допустимых пределах.

Для учёта пространственной неоднородности полей спутниковых оценок  $LST$ ,  $LAI$ ,  $B$  и осадков были разработаны алгоритмы ввода этих оценок в модель в узлах её вычислительной сетки. Для тех узлов, где в какие-либо сроки спутниковые оценки  $LST$  и осадков отсутствовали, значения температуры и влажности воздуха, а также интенсивности осадков рассчитывались с помощью процедуры

интерполяции IWD(M(*Inverseweighted distance method*) данных стандартных сетевых метеорологических наблюдений.

Конечным результатом моделирования являются оценки характеристик водного и теплового режимов исследуемой территории – влагозапасов почвы  $W$ , суммарного испарения  $Ev$ , инфильтрации воды в почву, потока влаги из её верхнего метрового слоя в нижележащие горизонты, потоков скрытого и явного тепла, а также радиационной LST  $T_s$ , температуры поверхности растительного покрова  $T_f$  и голой почвы  $T_g$  и распределений температуры и влажности почвы по глубине. Расчёты всех этих величин выполнены для территории части ЦЧР площадью 227 300 км<sup>2</sup> для сезона вегетации 2009–16 гг. Достоверность полученных оценок  $W$  и  $Ev$  подтверждена результатами сравнения с данными измерений этих величин на агрометеорологических станциях, а также с их значениями, рассчитанными по модели привсех рассмотренных вариантах определения LAI,  $B$ ,  $T_{s,eff}$ ,  $T_{ls}$ ,  $T_a$  и осадков по информации AVHRR/NOAA, MODIS/EOSTerraiAqua, SEVIRI/Meteosat-9, -10, МСУ-МР/Метеор-М №2. Погрешность оценки  $W$  для подавляющего числа сроков наблюдений рассматриваемых сезонов вегетации составляет 10–15% (см., например, рис. 4), что не превышает общепринятой величины ошибки определения значений  $W$ . Расхождения оценок  $Ev$  за пентаду при всех вариантах расчётов находятся в пределах нескольких мм (~20–25%), что также считается приемлемым результатом. Все рассчитанные с помощью LSM величины –  $W$ ,  $Ev$  и другие характеристики водного и теплого режимов исследуемого региона – представлены в виде распределений по его площади. В качестве примера подобного распределения на рис. 5а-в изображены поля значений  $W$ , рассчитанных по модели при оценках суточных сумм осадков по данным наземных измерений, данным SEVIRI и МСУ-МР для исследуемой территории на одну из дат сезона вегетации 2015 г., а на рис. 5 г-е для того же дня показаны распределения разностей всех попарно взятых значений  $W$ . Как видно из последнего рисунка, погрешности представленных оценок  $W$  находятся в указанных выше пределах.

Таким образом, использование полученных по спутниковым данным оценок метеорологических характеристик и характеристик растительного покрова при моделировании процессов влаго- и теплообмена покрытых растительностью территорий с атмосферой

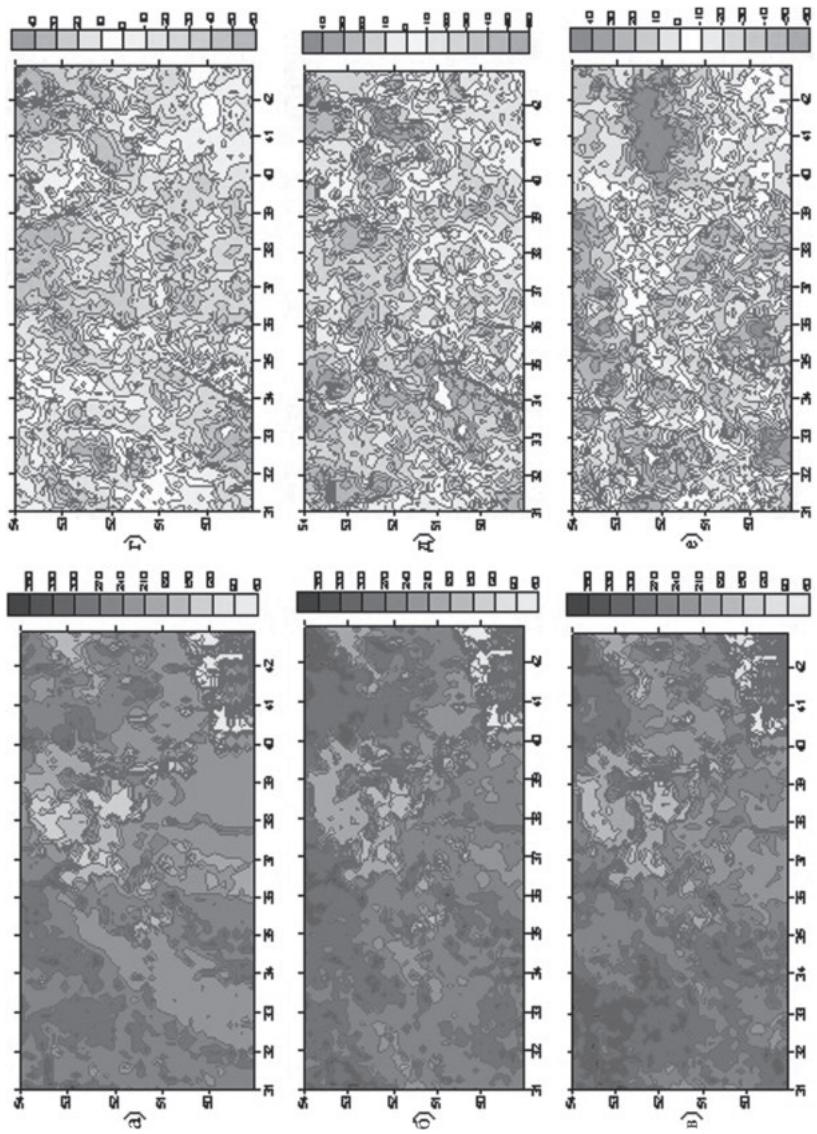


Рис. 5. Влагозапасы метрового слоя почвы  $W$  (мм) на 15.08.2015, рассчитанные по модели при опенке осадков по данным наземных наблюдений,  $W_{\text{наз}}$   
 (а), по данным SEVIRI ( $W_{\text{SEVIRI}}$ ), ( $W_{\text{SEVIRI}} - W_{\text{МСУ}}$ ) (б), ( $W_{\text{наз}} - W_{\text{SEVIRI}}$ ) (в), ( $W_{\text{SEVIRI}} - W_{\text{МСУ}}$ ) (г), ( $W_{\text{наз}} - W_{\text{МСУ}}$ ) (д) для территории Центрально-Черноземного района Еропейской части РФ площадью 227,3 тыс. км<sup>2</sup>

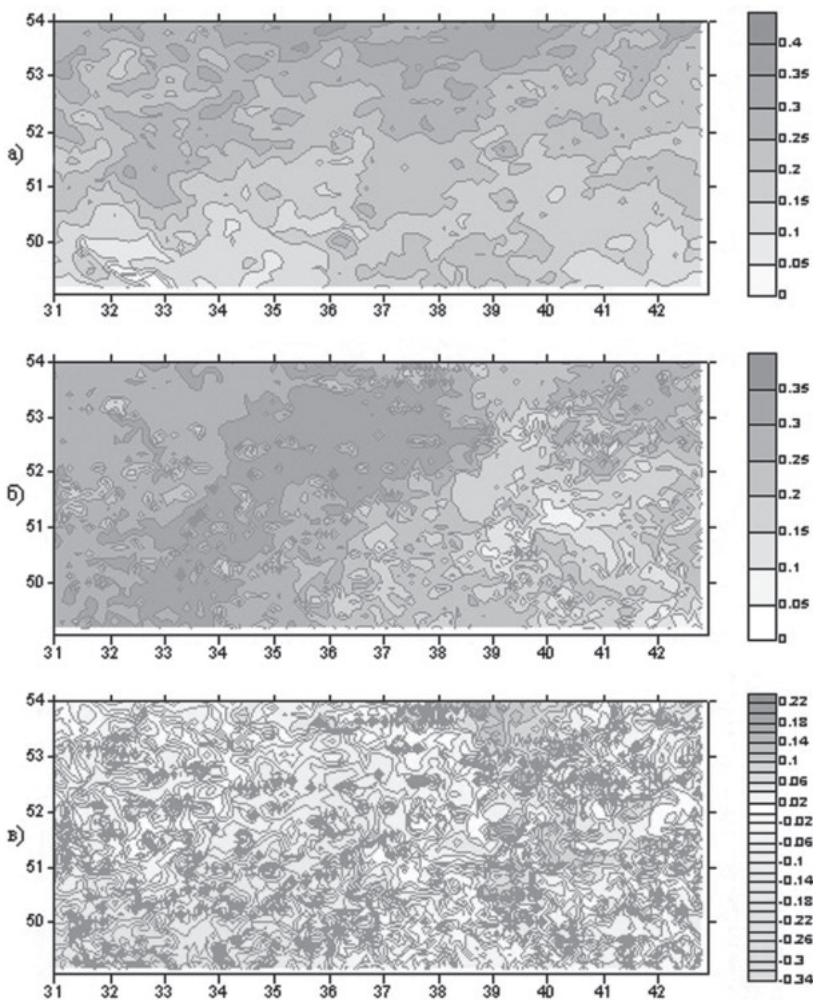


Рис. 6. Распределение по площади исследуемого региона значений влажности поверхности почвы, определённой по данным скаттерометра ASCAT/MetOp-B(а), рассчитанные по модели при использовании данных наземных наблюдений (б) и их разности (в) на 12.09.2016.

делает возможным построение и прослеживание динамики пространственных полей влагосодержания почвы, суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов этих территорий, в том числе значительных по площади.

## **Использование данных скаттерометра ASCAT при моделировании влажности почвы**

После запуска в 2013 г. спутника MetOp-B установленным на борту скаттерометром ASCAT – аппаратурой активного зондирования подстилающей поверхности в СВЧ диапазоне – появилась возможность оценки влажности поверхности почвы в её динамике для обширной территории. Результаты измерений ASCAT выражаются в процентах от 100 до 0, соответственно, при полном насыщении почвы влагой или при её отсутствии. Полученные оценки преобразуются в объёмные влажности верхнего слоя почвы (0–3 см) при умножении на значения пористости. Проверка корректности данных оценок производилась при их сравнении с результатами расчётов влажности поверхности почвы с помощью LSM, выполненных при использовании данных наземных наблюдений (рис. 6).

Как видно из рисунка, для большей части территории расхождения спутниковых и модельных оценок поверхностной влажности находились в допустимых пределах ( $\pm 0.05 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ). Такая точность данных ASCAT позволяет использовать их в LSM при задании начальных условий для уравнения вертикального влагопереноса в почве. Так, замена начальных профилей влажности почвы при её полном насыщении на профили, определённые по значению влажности, полученному по данным ASCAT на время начала расчёта, приводит к повышению точности оценки с помощью LSM влажности поверхности почвы и её влагозапасов.

Полученные по данным ASCAT значения поверхностной влажности использовались также для расчёта с помощью LSM испарения с поверхности почвы и последующего формирования верхнего граничного условия для уравнения вертикального влагопереноса в почве (Как известно, интенсивность испарения с почвы зависит от влажности её поверхности). В стандартной процедуре расчёта профиля влажности почвы её значение на поверхности берётся с предыдущего шага по времени. В настоящем расчёте используются значения поверхностной влажности, определяемые по данным ASCAT. Временные ходы влажности поверхности почвы за сезон вегетации 2016 г., рассчитанной по модели с верхним граничным условием для уравнения влагопереноса, задаваемым по данным наземных изме-

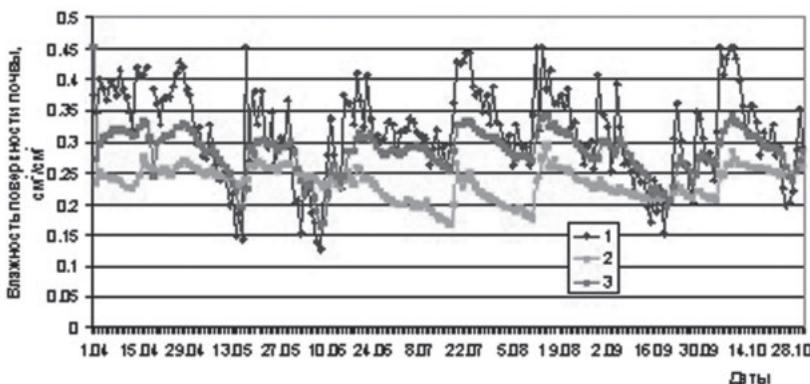


Рис. 7. Среднесуточные значения влажности поверхности почвы, определённые по данным скантерометра ASCAT/MetOp-B(1) и рассчитанные по модели с верхним граничным условием, определяемым по данным наземных измерений (2) и формируемым по данным ASCAT (3). Агрометеорологическая станция Дмитриев-Орловский, сезон вегетации 2016 г.

рений и по данным ASCAT, на одной из агрометеорологических станций региона представлены на рис. 7.

Представленные позитивные результаты использования данных ASCAT при моделировании влажности почвы являются предварительными. Описанное направление исследований, в котором используются спутниковые данные, получаемые с помощью современной аппаратуры независимо от погодных условий, представляется перспективным и требующим дальнейшего развития.

#### **Использование спутниковой информации в геоэкологических исследованиях водных объектов и их водосборов**

Интенсивная антропогенная нагрузка на водные объекты, высокий уровень их загрязнения, недостаточно развитая сеть стационарных гидрологических и гидрохимических наблюдений привели к тому, что на сегодняшний день природоохранные организации испытывают постоянный дефицит достоверной информации о состоянии этих объектов. Информация, которая может быть необходима для принятия решений, направленных не только на повышение эффективности использования и охраны водных ресурсов, но и на минимизацию экологических рисков для окружающей природной среды и человека, может быть получена при проведении комплексного мониторинга водных объектов, с помощью которого

в единую базу данных аккумулируются как различные наземные наблюдения, так и данные дистанционного зондирования. Взаимосвязь различных направлений и методов мониторинга с ориентацией на потребности управления водохозяйственным комплексом и выделение наиболее перспективных технологий (в том числе ГИС-технологий), детально рассмотрена в монографии [32] под редакцией Г.М. Баренбойма и Е.В. Веницианова, большая часть авторов которой является сотрудниками ИВП РАН.

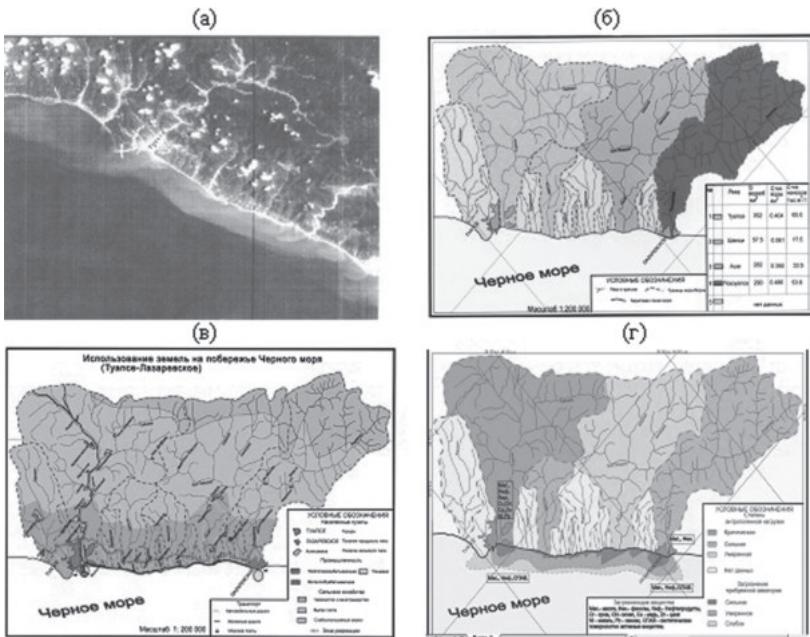
Важной производной космического мониторинга является геоинформационное картографирование, объединяющее компьютерные технологии, базы пространственно-временных картографических и спутниковых данных, преобразованных в соответствии с законами формирования образно-знаковой модели местности в итоговое картографическое произведение.

Результаты проводившихся в Институте последние два десятилетия исследований динамики и особенностей формирования прибрежных зон внутренних морей и крупных водохранилищ с использованием спутниковой информации позволили обосновать цели и задачи космического мониторинга различных водоёмов, сформулировать требования к данным дистанционного зондирования, необходимым для мониторинга, разработать его картографическое обеспечение и, как результат, составить карты, отражающих наиболее значимые проблемы конкретных водных объектов [15, 16, 22].

В основу приводившихся исследований положена концепция рассмотрения экологического состояния водоемов и их водосборов как единого геосистемного пространства [9]. При таком подходе за единицу исследования был принят частный речной водосбор, оценка вклада которого в изменение состояния водоёма определялась суммой характеристик, отражающих физико-географические, социальные и экономико-хозяйственные особенности его территории.

### **Изучение прибрежных зон внутренних морей с использованием данных ДЗЗ**

К настоящему времени на большей части морских побережий складывается сложная экологическая обстановка, обусловленная взаимодействием негативных природных и антропогенных факторов. Морские водоёмы являются аккумуляторами всевозможных загрязняющих веществ (ЗВ), поступающих от рассредоточенных по



Исследования, проведённые для побережий южных морей РФ, позволили выявить наиболее эффективные для них направления использования спектрозональной спутниковой информации [11].

Примеры практической оценки возможностей использования данных ДЗ были реализованы для участков Чёрного, Азовского и Каспийского морей (в пределах РФ) [11, 12, 13]. Ниже представлены результаты исследований для Чёрного моря.

Опыт совместного использования дистанционных, картографических и гидрологических данных был проведён для оценки антропогенного воздействия водосборов береговой зоны Чёрного моря в районе Туапсе-Лазаревская на прибрежные участки акватории (рис.8)[11]. Покосмическим изображениям масштаба 1:300 000 с разрешающей способностью 30 м, полученным в 1987–95 гг. сканером МСУ-Э (ИСЗ «Ресурс-01») в спектральном диапазоне 0,5–0,6 мкм, были выделены области распространения речного стока. Известно, что динамика дальности выноса загрязнённого речного стока на взморье зависит от расходов воды, направления ветра, интенсивности морских течений. Космические изображения позволяют получить картину, результирующую взаимодействие всех трёх факторов.

Анализ результатов дешифрирования разновременных материалов КС и батиметрической карты прибрежной зоны показал, что, как правило, загрязнённые речные струи на этом участке акватории прослеживаются до изобат 25–50, реже 100 м, то есть на расстоянии от 5–6 до 10–12 км от берега (рис. 8а). Более детально интерпретация визуального дешифрирования речных струй рассмотрена в работе [12]. Загрязнение прибрежной части акватории оценивалось по степени загрязнения речного стока антропогенными источниками, находящимися на водосборах. Материковый сток на этом участке представлен девятнадцатью водосборами (рис. 8б), из которых гидрологические данные имелись только для четырёх. Для каждого водосбора по картографическим и научно-справочным источникам были установлены типы использования земель (селитебные, промышленные, сельскохозяйственные, рекреационные и т.д.) и определена их доля от общей площади водосбора (рис. 8в). На рис. 8г представлен упрощённый вариант карты «Антропогенное воздействие на побережье Чёрного моря», на которой речные водосборы побережья дифференцированы в соответствии с результатами комплексной оценки

по трём степеням антропогенной нагрузки (критической, сильной, умеренной), определены основные загрязняющие вещества, выносимые речным стоком, и выделены три степени загрязнения прибрежной акватории (сильное, умеренное, слабое). Основные ЗВ в неочищенных сточных водах представлены тяжёлыми металлами, фенолами, азотом, фосфором, БПК<sub>полн</sub>, СПАВ, бактериальной загрязнённостью. Размер области мутьевого выноса из устья р. Туапсе составляет около 20 км<sup>2</sup> (примерно до изобаты 50 м). Этот участок с большой долей вероятности можно определить как наиболее загрязнённый на этом отрезке побережья. Подобный подход к изучению системы «водосбор–водоём» позволяет проводить предварительную оценку степени загрязнения водоёма, что особенно актуально для прибрежных морских зон.

#### **Приоритетные направления геоэкологического мониторинга русловых водохранилищ, расположенных в различных климатических зонах**

Русловые водохранилища – сложный, динамичный, многофункциональный природно-техногенный водный объект, нуждающийся в регулярном наблюдении и контроле с помощью государственного геоэкологического мониторинга.

В условиях значительного сокращения объёма экспедиционных работ и дефицита наземных данных в последние два десятилетия данные дистанционного зондирования позволяют в значительной мере осуществить наполнение информационной базы геоэкологического мониторинга современными качественными данными о гидрографических и морфометрических характеристиках берегов и притоков водохранилища, обновить топографические карты местности, выявить проблемные участки, построить цифровые модели рельефа прибрежных территорий, провести пространственно-временную экстраполяцию данных локальных наземных наблюдений. С помощью современной спектрозональной спутниковой съёмки высокого разрешения можно осуществлять детальный мониторинг водной массы, её глубин, областей распространения взвесей, береговых деформаций, состояния прибрежной и водной растительности, оценки степени увлажнённости почв и растительности прибрежных зон, выявление локальных источников загрязнения.

Актуальной является задача оптимизации структуры мониторинга так, чтобы минимальным набором тематических блоков наиболее полно охватить самые значимые аспекты формирования водохранилища и трансформации окружающей среды в конкретной природной зоне. Основные задачи и уровни проведения мониторинга при наблюдении за негативными процессами в самом водоёме и на его водосборной территории, а также рекомендации по выбору оптимальных спектральных диапазонов космической съёмки в зависимости от ключевых факторов, влияющих на формирование водохранилищ, рассмотрены в [19].

С помощью единой методики нами были выполнены исследования различных водохранилищ, как давно существующих, так и только планируемых к созданию – Нижнебогучанского (мерзлотно-таежная зона), Рыбинского (европейская таежная зона умеренно континентального климата), Цимлянского (равнинная лесостепная зона засушливого климата), Краснодарского (степная предгорная зона), Веселовского (степная и полупустынная зоны засушливого климата) [23, 18, 20, 19, 17, соответственно].

Для всех перечисленных водохранилищ с помощью ГИС «Карта 2011» были составлены инвентаризационные и эколого-географические карты. В качестве исходного материала использовались космические снимки разных ИСЗ и топографические карты, масштаб которых определялся размерами объекта исследования или его отдельных участков.

Ниже, в качестве примера эффективности использования космических снимков для изучения водохранилищ, приведены полученные результаты для Нижнебогучанского и Цимлянского водохранилищ.

### **Водохранилища мерзлотно-таежной зоны**

Исследование проведено для территории будущего ложа Нижнебогучанского водохранилища на р. Ангаре, планируемого к заполнению в 2022 г. [23]. Место строительства расположено в зоне распространения многолетней мерзлоты островного типа, большую часть территории занимают южно-таёжные леса. Труднодоступность региона ограничивает проведение систематических гидрологических, геоморфологических и эколого-географических обследований.

Для оценки воздействия будущего водохранилища на преобразование территории и выявления специфики формирования самого водоёма были привлечены дополнительные источники информации, в первую очередь дистанционной и картографической. В качестве исходных материалов использовались цифровые топографические карты масштабов 1:1000 000, 1:20 000, 1:50 000, данные съёмки СИСЗ Landsat-7 и IKONOS за 2014 г. Привлечение ГИС «Карта 2011» позволило создать и произвести редактирование цифровых карт и обработку данных ДЗЗ, получить синтезированные изображения для обновления и детализации содержания топографических карт, нанести границы непосредственного и косвенного влияния водохранилища на природные и социальные объекты. На синтезированных изображениях выделены три зоны: водная поверхность р. Ангары до затопления, зона полного затопления берегов при заполнении водохранилища до отметки планируемого НПУ 140 м и зона подтопления – до горизонтали 160 м, которая условно может считаться границей влия-

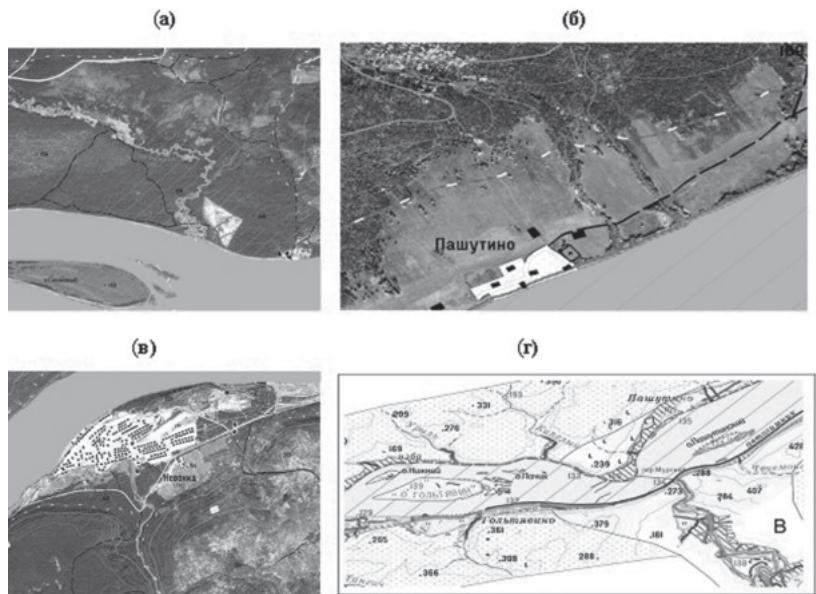


Рис. 9. Фрагменты синтезированного изображения КС и топографической карты масштаба 1:50 000. Затапливаемая часть долины р. Сосновка (а), зоны затопления и подтопления в районе д. Пашутино (б), зоны затопления и влияния водохранилища в районе пос. Невонка и р. Невонка (в), фрагмент карты «Изменение природной среды зоны затопления Нижне-Богучанского водохранилища» масштаба 1:200 000 (г).

ния водохранилища на прилегающую территорию. На выбор этой отметки повлиял тот факт, что общей особенностью оползней в осадочных породах зоны многолетней мерзлоты является возможность их образования на склонах крутизной более  $16^{\circ}$  и высотой более 20 м [5]. Анализ синтезированных изображений «снимок-карта» показал, что в зону полного затопления попадут острова и все низменные и заболоченные участки прибрежных территорий, имеющие отметки высот менее 140 м, на которых в настоящее время находится значительная часть сельскохозяйственных угодий, населённые пункты, дороги и другие объекты инфраструктуры [23]. Например, у р. Сосновка, длина которой 29,0 км, протяжённость русла в зоне полного затопления составит 4,9 км, а в зоне влияния – 5,1 км (рис. 9а).

Поселок Невонка (1655 жителей), расположенный в устье р. Невонки, будет целиком находиться в зоне прямого и косвенного влияния (рис. 9б), а в деревне Пащутино ещё и почти все сельхозугодья попадают в зону возможного подтопления (рис. 9в). На протяжении всей длины будущего водохранилища (107 км) в Ангару с левого и правого берега впадает 57 притоков. Подпорные воды затопят устьевые участки рек и их долины, поднимутся вверх по течению, формируя заливы различной конфигурации и глубины вреза. Проведённый подсчёт длин всех притоков, расположенных в выделенных зонах, показал, что полностью будет затоплено 54 км нижних русловых участков и почти 160 км окажутся в зоне возможного влияния. С помощью ГИС «Карта 2011» была разработана базовая карта «Изменение природной среды в зоне затопления Нижнебогучанского водохранилища» масштаба 1:200 000, для создания которой была использована ландшафтная карта (рис. 9г). Совмещение тематических слоёв с топографическим содержанием и ландшафтным районированием позволило определить, какие типы ландшафтов (поймы крупных рек, поймы и низкие надпойменные террасы, плато увалисто-холмистые и грядовые, густо расчленённые), попадут в зону затопления и зону косвенного влияния будущего водохранилища. Использование спутниковых методов значительно увеличило объём и качество информации, необходимой для изучения труднодоступных территорий. Выделены и детализированы границы будущего водоёма, выполнено обновление содержания топографических карт, проведены расчёты площадей природных и антропогенных объек-

тов, затапливаемых полностью или попадающих в зону подтопления. Полученные результаты рассматриваются как начальный вклад в создаваемую базу данных мониторинга будущего водохранилища, содержащий информацию о современном состоянии природно-территориальных береговых комплексов р. Ангары в зонах планируемого затопления и предполагаемого влияния. Эти сведения могут использоваться для изучения трансформации водохранилища и береговой зоны на различных этапах его формирования в случае реализации проекта.

### **Водохранилища лесостепной равнинной зоны**

Водохранилища юга РФ в гораздо большей степени, чем водохранилища других природных зон, чувствительны к изменениям климата и усилинию антропогенной нагрузки. В последние годы практически на всех водоёмах региона из-за маловодья наблюдалось заметное падение уровня воды. Тяжёлая экологическая ситуация сложилась на Цимлянском водохранилище, созданном в 1952 г., крупнейшем искусственном водоёме на юге РФ. По данным Донского бассейнового водного управления (БВУ), уменьшение весеннего притока паводковых вод к Цимлянскому водохранилищу до 54% от нормы (в 2007 г.) и до 34% (в 2011) впервые за 27 лет привело к снижению его уровня больше чем на 4 м – с 36 м (отметки НПУ) до 31,75 м абр. В июне 2016 г. ситуация немного улучшилась – уровень воды был на отметке 33 м.

Инвентаризация состояния береговой зоны водохранилища в критической гидрологической ситуации проводилась по совместному анализу топокарт масштаба 1:100 000 (1978 г.), накоторых, согласно требованиям их составления, положение береговой линии соответствует НПУ водохранилища (36,00 м абр) и космическим изображениям высокого разрешения, полученные с ИСЗ WorldView-2 19 сентября 2011 г. [20, 21], когда уровень воды был близок к минимальному (32,15 м абр). По результатам сравнения снимков и топографических карт (рис. 10) выделены участки акватории и береговой зоны с наибольшими изменениями. Самым чувствительным к изменениям уровня является верхний бьеф водохранилища – Чирский плёс (рис. 10б, в). Обнажившиеся участки мелководного дна в виде островов, мелей, вдоль береговых отмелей отображаются различными оттенками

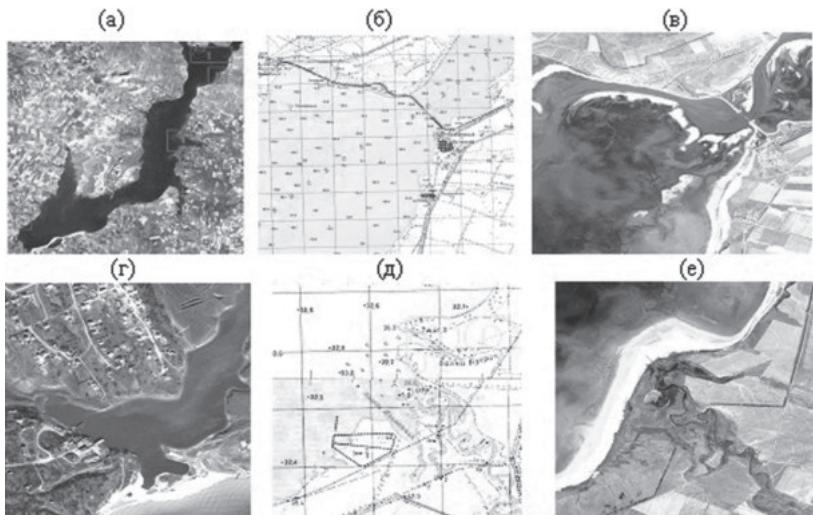


Рис. 10. Космический снимок Цимлянского водохранилища (а). Красными прямоугольниками отмечены наиболее чувствительные к обмелению участки; верхняя часть Чирского плёса на топографической карте 1978 г. при НПУ 36,0 м. (б) и на космическом снимке 2011 г. (в), балка Крутая полностью отделена от акватории, 2011 г. (г), устье реки Мышковы на топографической карте 1978 г. при НПУ 36,0 м. (д) и обмелевшее, заросшее в 2011 г. (е)

серого цвета. Водная поверхность полностью покрыта сине-зелёными водорослями. Полученная информация может быть использована как при обновлении батиметрической карты всего водохранилища с учётом заилиения дна, так и при уточнении крупномасштабной локации для обеспечения безопасности судового хода.

К участкам другого типа, также чувствительно реагирующим на колебания уровня и накопление наносов, относятся устья балок и рек бокового притока. Балка Крутая, расположенная в 4 км от г. Цимлянска, может служить характерным примером изменений в устьях подобных заливов. Сочетание понижения уровня и накопления наносов, поступающих с водосбора балки, привело к тому, что устье балки перекрыто широкой отмелью, вход в бухту полностью отрезан от водохранилища (рис. 10г). Примером трансформации устья малой реки может служить река Мышкова, длина которой 129 км и площадь водосбора 1393 км<sup>2</sup>. На топокарте 1978 г. зафиксировано, что при впадении в водохранилище она образовывала залив длиной 5 и шириной 3 км, в центре которого был остров высотой около 10 м. По

берегам залива располагались рыбопитомники, обвалованные двухметровыми дамбами (рис. 10д). На космическом изображении от 24 сентября 2011 г. с IC3WorldView-2, (рис. 10е) отображенное осушение залива, его зарастание кустарниковой и тростниковой растительностью, образование широкой отмели, перекрывающей бывший залив и узкую прорезь русла реки в ее илистых отложениях. Похожие ситуации прослеживаются и в устьях других рек, впадающих в водохранилище.

Карта динамики берегов Цимлянского водохранилища составлена с помощью геоинформационной системы Quantum GIS на которой показаны береговые линии, соответствующие уровням 36, 35, 34, 32 м абр., зоны последовательного осушения и типы берегов [20]. Опыт работы с материалами космической съемки высокого разрешения показал ее информационные возможности для изучения процессов переработки берегов, заилиения мелководий, загрязнения и эвтрофирования водоема.

Выявленный характер изменений состояния Цимлянского водохранилища в период длительного маловодья может быть использован для решения инвентаризационных задач геоэкологического мониторинга береговой зоны водоема в последующие годы.

### **Заключение**

Основным результатом проводившихся в ИВП РАН в последние годы исследований возможностей использования спутниковой информации при моделировании гидрологических процессов можно считать предложенный метод воспроизведения полей водного и теплового режимов покрытых растительностью территорий, в том числе характеризующихся недостатком наземных наблюдений. Основу метода представляет разработанная для территории регионального масштаба физико-математическая модель влаго- и теплообмена участков суши с атмосферой, адаптированная к спутниковым данным о состоянии подстилающей поверхности и метеорологических условиях. При создании этого метода и его численной реализации:

разработаны новые или усовершенствованы существовавшие методы и технологии тематической обработки данных измерений радиометров AVHRR/NOAA, MODIS/Terra/Aqua, SEVIRI/Meteosat-9,-10, МСУ-МР/Метеор-М №2 и построения оценок характеристик растительно-

го покрова, температуры подстилающей поверхности и осадков. Все технологии адаптированы к территории части Центрально-Чернозёмного региона РФ площадью 227 300 км<sup>2</sup>;

разработаны процедуры использования в модели спутниковых оценок названных характеристик при учёте пространственной неоднородности их полей. Произведенные проверки функционирования модели подтвердили корректность применения данных процедур;

с помощью разработанной модели выполнены расчёты запасов почвенной влаги суммарного испарения и других характеристик водного и теплового режимов территории исследуемого региона за сезоны вегетации 2009–16 гг. Значения всех рассчитанных величин представлены в виде распределений по площади данного региона, при этом погрешности их оценки находятся в допустимых пределах.

Результаты расчёта влагозапасов почвы как основной водноресурсной характеристики обширных сельскохозяйственных регионов могут использоваться для оценки влагообеспеченности этих регионов, в том числе в условиях антропогенных воздействий и изменений климата. Результаты оценки характеристик водного и теплового режимов территории могут применяться и для решения прикладных задач, например, для разработки норм полива сельскохозяйственных культур, произрастающих на засушливых землях. Успешность реализации разработанной модели напрямую определяется возможностью ассимиляции спутниковых данных разных спектральных диапазонов.

При изучении возможностей использования спутниковой информации в геоэкологических исследованиях водных объектов и их водохранилищ были получены следующие результаты:

в соответствии с бассейновой концепцией природопользования разработана структура комплексного мониторинга прибрежных зон морей и водохранилищ, а также его картографического блока, что позволило сформировать цельную картину изменений, происходящих в геосистеме приёмных водоёмов, и определить проблемные направления дальнейших исследований;

обоснован выбор типов космической информации, её пространственного охвата и масштаба в зависимости от зональных и ландшафтных условий расположения водохранилищ и их морфометри-

ческих характеристик, назначения и специфики хозяйственного использования, характера влияния боковых притоков разного ранга и их водосборов, природных особенностей и видов антропогенной нагрузки;

разработана методика получения на основе интерпретации дистанционных и картографических материалов количественных и качественных данных о пространственно-временных изменениях природно-территориальных комплексов в системе «водосбор–водоток–водоём», что обеспечило появление альтернативного источника информации при дефиците наземных наблюдений.

Целью дальнейших исследований по данному направлению является разработка методологии проведения геоэкологического мониторинга внутренних морей и крупных озёр и водохранилищ на основе совместного использования дистанционного и картографического методов исследований и ГИС-технологий в рамках создания единой технологической платформы комплексного мониторинга водохозяйственных систем.

В перспективе космический мониторинг водных объектов должен стать связующим элементом в системе комплексного управления речными бассейнами и прибрежными зонами приемных водоемов (озер, водохранилищ, морей), главная цель которого – сохранение водных ресурсов, внедрение рациональных природосберегающих технологий при хозяйственном освоении водосборов, не наносящем ущерба экосистемам и самому человеку.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балашов В.М., Курбатова И.Е., Соколов Ю.С. Динамика границ Каспийского моря // В сб.: Прикаспийский регион. Проблемы социально-экономического развития. Т. 8. Аэрокосмические исследования. М.: Изд-во АН СССР, 1987. С. 229–239.

2. Верещака Т.В., Красножон Г.Ф., Курбатова И.Е. Особенности дешифрирования космических снимков морских побережий со стонно-нагонными явлениями // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка. №4, 1986. С. 93–97.

3. Волкова Е.В., Успенский А.Б. Оценки параметров облачного покрова и осадков по данным сканирующих радиометров полярно-орбитальных и геостационарных метеоспутников. // Исследование Земли из космоса. №5, 2015. С. 30–43.

4. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и

эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13, №5, 2016. С. 291–303.

5. Гоголев Е.С. К вопросу изменения рельефа ложа и берегов северных водохранилищ // Проблемы инженерно-геологических изысканий в криолитозоне. Магадан: Колымское газетное издательство, 1989. С. 267–268.

6. Джамалов Р.Г., Объедков Ю.Л. Применение дистанционной информации при прогнозной оценке подземного стока // Исследование Земли из космоса. №5, 1983. С. 60–66.

7. Калинин Г.П. От аэрокосмических снимков к расчётом и прогнозам стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 40 с.

8. Калинин Г.П., Курилова Ю.В., Колосов П.А. Космические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 184 с.

9. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании // Иркутск: Изд. Института географии СО РАН, 2001. 163 с.

10. Красножон Г.Ф. Географическая интерпретация материалов дистанционного зондирования устьевых областей рек и шельфовых зон морей // В кн.: Географическая интерпретация аэрокосмической информации. М.: Наука, 1988. С. 41–58.

11. Кукса В.И., Курбатова И.Е. О распространении загрязняющих веществ в прибрежных водах у Кавказского побережья Чёрного моря // Сб. статей «Водные проблемы на рубеже веков». М.: Наука, 1999. С. 208–216.

12. Кукса В.И., Курбатова И.Е. Изучение динамики вод и наносов в прибрежных зонах Чёрного и Азовского морей с использованием дистанционных методов // Сб. докладов V конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: ИВП РАН, 22–26 ноября 1999. 1999. С.188–191.

13. Курбатова И.Е. Выявление и картографирование зон затопления побережья Северного Каспия при сгонно-нагонных колебаниях уровня моря по материалам космической съёмки // Водные ресурсы. Т. 20, №5, 1993. С.654–658.

14. Курбатова И.Е. Картографическое обеспечение экологического мониторинга морских побережий. // Экологические системы и прибрежья. №9, 2000. С. 2–6.

15. Курбатова И.Е. Космический мониторинг водных объектов – цели, задачи, возможности. // Сборник статей «Космический вызов XXI века». М.: Изд. Торус Пресс, Т. 1, 2005. С. 480–490.

16. Курбатова И.Е. Роль аэрокосмического мониторинга в информационном обеспечении комплексных экологических исследований системы «водосбор–водоём» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып. 2, Т. 2, 2005. С. 111–117.

17. Курбатова И.Е. Разработка структуры научно-справочного картографирования природной среды Кумо-Манычской впадины для целей экологической экспертизы // Аридные экосистемы. Т. 16, №1 (41), 2010. С. 66–75.

18. Курбатова И.Е. Разработка картографического обеспечения экологических исследований Рыбинского водохранилища и его прибрежных территорий // Мологский край и Рыбинское водохранилище. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 145–150.
19. Курбатова И.Е. Космический мониторинг негативных ситуаций в прибрежных зонах крупных водоёмов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 9, №2, 2012. С. 52–59.
20. Курбатова И.Е. Использование космической информации для мониторинга природно-территориальных комплексов побережья Цимлянского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 10, №3, 2013. С. 217–227.
21. Курбатова И.Е. Использование ГИС-технологий для оценки влияния антропогенно нарушенных водосборов боковых притоков на Цимлянское водохранилище // Материалы III международной научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Майкоп: ИП Кучеренко В.О., 2015. С. 136–146.
22. Курбатова И.Е. Дистанционные технологии мониторинга водных объектов // Научные основы создания системы мониторинга качества природных поверхностных вод. Гл. 13. М.: Научный мир, 2016. С. 328–362.
23. Курбатова И.Е. Использование спутниковой информации для предварительной оценки изменения окружающей среды в зоне предполагаемого строительства Нижнебогучанского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 14, №2, 2017. С. 195–205
24. Кучмент Л.С., Гельфанд А.Н., Демидов В.Н., Романов П.Ю. Использование спутниковой информации о характеристиках снежного покрова в физико-математической модели формирования весеннего половодья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 7, №2, 2010. С. 167–173.
25. Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Старцева З.П. Моделирование влагопереноса в системе «почва–растительность–приземный слой атмосферы» для гидрологических задач // Водные ресурсы. №2, 1989. С. 32–39.
26. Кучмент Л.С., Романов П.Ю., Гельфанд А.Н., Демидов В.Н. Оценка характеристик снежного покрова путём совместного использования моделей и спутниковой информации // Исследование Земли из космоса. №4, 2009. С. 47–56.
27. Музылёв Е.Л. Моделирование стока горных рек и спутниковая информация. М.: Наука, 1987. 136 с.
28. Музылёв Е.Л., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Старцева З.П. Использование спутниковой информации при моделировании вертикального тепло- и влагопереноса для речных водосборов // Исследование Земли из космоса. №4, 2005. С. 35–44.
29. Музылёв Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В. Моделирование гидрологического цикла речных водосборов с использованием спутниковой информации // Исследование Земли из космоса. №4, 2005. С. 45–54.

ем синхронной спутниковой информации высокого разрешения // Метеорология и гидрология. №5, 2002. С. 68–82.

30. Музылёв Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В. Моделирование составляющих водного и теплового балансов для речного водосбора с использованием спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности // Метеорология и гидрология. №3, 2010. С. 118–133.

31. Музылёв Е.Л., Успенский А.Б., Старцева З.П., Волкова Е.В., Кухарский А.В., Успенский С.А. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании компонент водного и теплового балансов территории Центрально-Черноземных областей России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 12, №6, 2015. С. 17–34.

32. Научные основы создания системы мониторинга качества природных поверхностных вод. М.: Научный мир, 2016. 462 с.

33. Новикова Н.М. Динамика растительности дельтовых равнин аридных районов вследствие антропогенного преобразования речного стока // В кн.: Биogeографические аспекты опустынивания. М.: Московский Филиал Географического Общества, 1985. С. 36–40.

34. Объедков Ю.Л. Формирование естественных ресурсов подземных вод аридных районов. М.: Наука, 1986. 154 с.

35. Объедков Ю.Л. Изучение термальных вод западного побережья Каспийского моря по материалам дистанционной информации // В сб.: Прикаспийский регион. Проблемы социально-экономического развития. Т. 8. Аэрокосмические исследования. М.: Изд-во АН СССР, 1987. С. 218–229.

36. Объедков Ю.Л. Использование материалов космической съемки для составления средне- и мелкомасштабных гидрогеологических карт // В кн.: Получение и использование данных космической фотосъемки. М.: ЦНИИГАиК, 1992. С. 70–80.

37. Объедков Ю.Л. Эволюция дистанционных методов исследования природных вод // В кн.: Воды суши. Проблемы и решения. М.: Ин-т водных проблем РАН, 1994. С. 528–541.

38. Салтанкин В.П. Перспективы применения дистанционных методов для изучения водохранилищ // Тр. координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 122. Л.: Изд-во Энергия, 1977. С. 129–135.

39. Салтанкин В.П., Соколов Ю.С. Использование дистанционной информации при обосновании водоохранных зон водохранилищ (на примере Иваньковского водохранилища) // В кн.: Проблемы изучения и использования водных ресурсов. М.: ИВП АН СССР, 1979. С. 174–178.

40. Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А. Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. №3, 2010. С. 5–17.

41. Успенский А.Б., Щербина Г.И. Оценка температуры и излучательной способности поверхности суши по данным измерений уходящего

теплового излучения с ИСЗ NOAA // Исследование Земли из космоса. №5, 1996. С. 4–13.

42. Gelfan A., Muzylov E., Uspensky A., Startseva Z., Romanov P. Remote Sensing Based Modeling of Water and Heat Regimes in a Vast Agricultural Region // Remote Sensing – Applications. Ed. Boris Escalante-Ramirez. In-Tech – Open Access Publisher, Rijeka, Croatia, 2012. Chapter 6. P. 141–176.

43. Gelfan A.N., Pomeroy J.W., Kuchment L.S. Modelling forest cover influences on snow accumulation, sublimation and melt // Journal of Hydro-meteorology. V. 5, №5, 2004. P. 785–803.

44. Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation // Hydrology and Earth System Sciences. V. 14, 2010. P. 339–350.

45. Startseva Z., Muzylov E., Volkova E., Uspensky A., Uspensky S. Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data // International Journal of Remote Sensing. V. 35, №15, 2014. P. 5775–5799.

# **Изотопная гидрология: пути развития и решаемые проблемы**

*В.И. Ферронский*

## **Введение**

Идея вероятного существования в природе разных по массе атомов одного и того же элемента впервые была высказана английским геохимиком Ф. Содди в 1910 г. Он же предложил для таких атомов термин «изотопы». В 1913 г. Д. Томсон в Кавендишской лаборатории открыл первый стабильный изотоп с массой 22 у неона. В последующие несколько лет на сконструированном масс-спектрометре Ф. Астон открыл около 200 стабильных изотопов различных элементов, кроме водорода и кислорода. В 1929 г. У.Джиоки и Г. Джонстон открыли изотопы кислорода с массами 17 и 18, а в 1932 г. под руководством Г. Юри был зарегистрирован тяжёлый стабильный изотоп водородадейтерий. К настоящему времени известно около 300 стабильных изотопов у элементов с атомным номером  $Z \leq 83$ . Начало открытию радиоактивных изотопов было положено французскими физиками А. Беккерелем (1896 г.), М. и П. Юри (1898 г.). Теперь известно более 2000 радиоактивных изотопов, из которых около 300 – природные, а остальные получены искусственно на основе ядерных реакций.

Вскоре после открытия стабильных изотопов водорода и кислорода начались исследования по изучению их распространённости в природных речных, озёрных, морских, дождевых и подземных водах. Первые такие работы были выполнены в период 1932–41 гг. С появлением более совершенных масс-спектрометрических приборов А. Демпстера и А. Нира, и особенно после их усовершенствования К. МакКинни в 1950 г., исследования изотопного состава природных вод приобрели широкий размах. В организации и проведении исследований по гидрохимии водорода и кислорода в разных странах немалая заслуга принадлежит таким исследователям старшего поколения, как Юри, К. Ранкама, А.П. Виноградов, которые сыграли важную роль в развитии геохимии изотопов в целом.

Среди общих природных закономерностей было установлено, что вода основного резервуара гидросфера – Мирового океана обладает весьма однородным изотопным составом водорода и кислорода. Этот факт дал основание Г. Крейгу [Craig, 1961]

предложить её в качестве стандарта, относительно которого стали выражать измерения содержания дейтерия и кислорода-18 во всех других объектах.

Положительную роль в развитии основ изотопной гидрологии сыграла инициатива ЮНЕСКО по проведению Международного гидрологического десятилетия (МГД) 1965–74 гг. В программе этого проекта были предусмотрены гидрологические исследования с помощью изотопных и ядерных методов. Для организации и руководства этими работами была создана рабочая группа из специалистов ведущих стран мира, работавшая под эгидой МАГАТЭ. Основным достижением рабочей группы явилась организация мониторинга изотопного состава атмосферных осадков на глобальной сети гидрометеостанций МАГАТЭ/ВМО. Отбор и анализ среднемесячных проб атмосферных осадков стали основой для развития глобальной гидрологии. Автору довелось быть членом рабочей группы, а позднее сотрудником МАГАТЭ, участвовать в разработке и исполнении программы изотопных исследований. К настоящему времени накоплен большой фактический материал по изотопному составу атмосферных осадков земного шара. Данные о концентрациях дейтерия и кислорода-18 в осадках систематизируются и публикуются МАГАТЭ. Банк этих данных доступен для использования.

Наиболее важный вывод, который следует из рассмотрения изотопного состава подземных вод, состоит в том, что их формирование в артезианских бассейнах протекало в результате смешения в разных пропорциях вод морского генезиса с метеорными водами более поздних эпох. Какие-либо факты присутствия в их составе воды ювенильного происхождения не найдены. Более того, на примере использования данных об изотопном составе гидротерм в областях современного вулканализма во всех районах мира было установлено, что вода горячих источников представляет атмосферные осадки местного происхождения. Не менее убедительно было показано, что в большинстве исследованных рудных месторождений гидротермального происхождения основная роль в исходных рудоносных гидротермальных растворах принадлежит метеогенным водам.

Большую роль в унификации способов выражения изотопного состава водорода и кислорода и некоторых других элементов при-

родных объектов играет работа, которую периодически проводит Секция изотопной гидрологии МАГАТЭ по взаимному сравнению основных изотопных стандартов. В этой работе принимают участие ведущие масс-спектрометрические лаборатории многих стран. Наиболее популярным стандартом для выражения изотопного состава водорода и кислорода является Венский стандарт среднекосмической воды (SMOW).

История исследования космогенных изотопов берёт начало с 1912 г., когда австрийский физик В. Гесс по эффекту ионизации молекул воздуха, возрастающему с высотой, открыл космические лучи. Было установлено, что первичное космическое излучение солнечного, галактического и метагалактического происхождения, обладающее высокой энергией частиц (в основном протонов), в результате взаимодействия с ядрами атомов воздуха образует вторичное, с меньшей энергией излучение. Вторичное излучение при ядерных реакциях с ядрами атомов воздуха образует множество космогенных радиоактивных изотопов. Наиболее широкое распространение в гидрологической практике изучения природных вод нашли космогенные изотопы – тритий и радиоуглерод.

В 1934 г. М. Олифант, П. Гартек и Э. Розерфорд при бомбардировке дейтонами соединений, содержащих дейтерий, обнаружили треки частиц с массами 3, которые были отнесены к тритию и гелию. Предположение о радиоактивном превращении трития в гелий подтвердили Д. Альварец и Р. Корног в 1939 г.

В 1934 г. Л. Кури, а затем в 1936 г. Т. Боннер и М. Брубакер, К. Бурхем и М. Гольдхабер, облучая в камере нейтронами воздух, обнаружили, что на атомах азота по реакции  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  образуется радиоуглерод.. В 1941 г. Р. Корног и У. Либби показали, что при реакциях  $(n, p)$  на азоте быстрые нейтроны образуют тритий, а медленные –  $^{14}\text{C}$ . В 1946 г. Либби зарегистрировал радиоуглерод в атмосфере и пришёл к выводу о том, что  $^{14}\text{C}$  должен содержаться в биосфере. Так было положено начало радиоуглеродному датированию. Период полураспада  $^{14}\text{C}$  был определён не сразу. Вначале по аналогии с  $^{35}\text{S}$  предполагалось, что он равен 4 месяцам. Затем называлась цифра 25 000 лет, и лишь позднее было найдено его реальное значение, равное 5730 годам.

Вядоядерную эпоху удалось выполнить лишь единичные измерения природных концентраций трития в воде. В период с 1952 по 1963 г. при испытаниях термоядерного оружия в атмосферу было выброшено такое количество трития, которое на два порядка превышало его естественное содержание. Что касается радиоуглерода, то его содержание также было пополнено  $^{14}\text{C}$  бомбового происхождения, однако в значительно меньших пропорциях. Радиоактивность космогенных изотопов определяется радиометрическими методами с помощью низкофоновых бета-спектрометров со спонтанноизлучающими детекторами или с использованием пропорциональных счётчиков внутреннего наполнения.

Концентрацию трития в природных объектах принято выражать в тритиевых единицах (ТЕ). Одна ТЕ соответствует содержанию одного атома трития на  $10^{18}$  атомов протия. До недавнего времени считалось, что период полураспада трития составляет 12,26 лет. В сентябре 1979 г. группа экспертов, собравшаяся в Вене в МАГАТЭ, рассмотрела новые экспериментальные данные Национального бюро стандартов США и приняла новое значение периода полураспада трития, равное 12,430 лет. Этому новому значению периода полураспада (стандарт NBS SRM-4526C) соответствует постоянная распада  $\lambda=0,55764 \text{ год}^{-1}$ . При этом 1 ТЕ = 7,088 расп. мин. в  $1 \text{ кг}^{-1}$  воды или 1 ТЕ = 3,193 пКи  $\text{кг}^{-1}$  воды. В 2000 г. при работе по программе МАГАТЭ TRIC-2000 период полураспада трития был уточнён и принят равным 12,32 года при постоянной распада  $\lambda=0,05625 \text{ год}^{-1}$  (1 ТЕ = 0,119 Бк на 1 кг воды).

Радиоактивность других космогенных радионуклидов измеряются в единицах распада в минуту на 1 кг или 1 т воды. Суммарная активность радионуклидов измеряется в Кюри (Ки) или Беккерелях (Бк). 1 Ки эквивалентен  $3,7 \cdot 10^{10}$  распад/с или  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

Для унификации радиоуглеродных измерений предложено выражать содержание радиоуглерода в процентах (или промилле) от стандарта современного углерода. В качестве международного стандарта используют эталон Национального бюро стандартов США (NBS), которым является щавелевая кислота с радиоактивностью 14,3 распад/мин на 1 г углерода ( $1,176 \cdot 10^{-10} \text{ \% } ^{14}\text{C}$ ). Стандарт современного углерода определён как удельная активность  $^{14}\text{C}$  в древесине, произраставшей в 1950 г., после введения поправки на изотоп-

ное фракционирование и присутствие в атмосфере «индустриального» углекислого газа [Stuiver, Suess, 1966].

Другими космогенными изотопами для исследования воды гидросферы являются  $^{7}\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{37}\text{Ar}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ . Исследование закономерностей распределения этих изотопов в природных водах сдерживается главным образом техническими трудностями отбора, концентрирования и техники измерений соответствующих проб.

Радиогенные изотопы уран-ториевых рядов, период жизни которых сопоставим со временем существования гидросферы и Земли в целом, до последнего времени использовались, как правило, для геохронологии. Однако исследования по изучению их распределения в природных водах показали, что они являются весьма ценным индикатором процессов движения и возраста природных вод и донных осадков как в региональном, так и глобальном масштабе за длительное геологическое время. Здесь, как и в случае космогенных изотопов, есть технические трудности с измерением низких уровней природной радиоактивности.

### Стабильные изотопы гидросферы

В природной воде на Земле на  $10^6$  молекул  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  в среднем приходится 320 молекул  $\text{HDO}$ , 380 молекул  $\text{H}_2^{17}\text{O}$  и около 2000 молекул  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ . Отношение содержаниядейтерия к протиоу  $\text{D/H} = 0,000155$  (0,0150 at.%), а отношение содержания кислорода  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 0,002$  (0,2 at.%).

Пределы колебания концентрацийдейтерия на порядок и более превосходят пределы колебания в содержании тяжелого кислорода. Объясняется это тем, чтодейтерий и протий разделяются в природных процессах более эффективно, чем любая другая пара стабильных изотопов в силу большей разницы в атомных весах или силе тяжести (табл. 1).

Вариации относительного содержаниядейтерия в глубоких слоях океанов составляют около 4‰, а кислорода-18 – 0,3‰. В поверхностном слое океана наблюдаются некоторые региональные изменения. Величина их зависит от температуры воды и составляет длядейтерия около 35‰ и для кислорода-18 около 3‰. Пониженное содержаниедейтерия в поверхностном слое океанов отмечается в

Таблица 1

**Концентрации стабильных изотопов некоторых элементов в природных объектах**

Элементы	Отношение изотопов	Пределы изменения абсолютной величины	Относительное изменение предельной величины
H	D/H	0,000079–0,000195	147
Li	$^8\text{Li}/^7\text{Li}$	0,079–0,084	6
B	$^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$	0,226–0,234	3,5
C	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	0,01079–0,010225	13
O	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	0,001893–0,002083	10
Si	$^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$	0,0332–0,0342	0,5
S	$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$	0,0427–0,0491	13

тех районах, где на изотопный состав оказывает влияние вода, поступающая от таяния льда. В высоких широтах, где поверхностный слой замерзает, может происходить фракционирование изотопов водорода и кислорода в системе лёд–жидкость. Коэффициент разделения в этом случае составляет около 1,0180 длядейтерия и примерно 1,0030 для кислорода-18. В экваториальной части океана, где

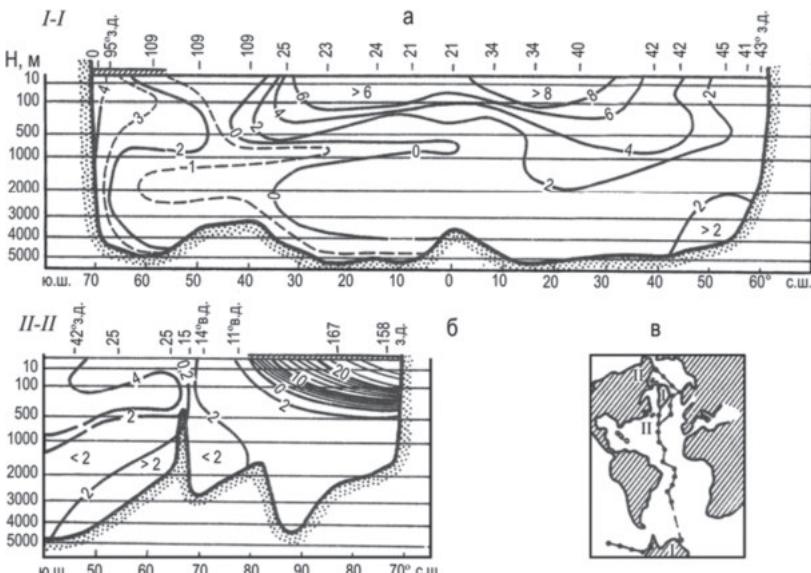


Рис. 1. Распределение концентрацийдейтерия, %, по разрезу в водах Атлантического и Северного Ледовитого океанов

интенсивно испаряется вода, происходит некоторое обогащение поверхности слоя тяжёлыми изотопами.

Пределы изменения концентраций D и  $^{18}\text{O}$  по широте и глубине для глубоких океанических вод более чем на порядок превышают абсолютную погрешность, с которой современная методика и техника масс-спектрометрических измерений позволяет производить массовые определения содержания дейтерия ( $\pm 2\%$ ) и кислорода-18 ( $\pm 0,02\%$ ). На основе выполненных исследований можно составить общую картину распределения D и  $^{18}\text{O}$  в водах океана.

На рис. 1 в изолиниях показана картина распределения дейтерия по разрезу и в поверхностном слое воды Атлантического океана и бассейна Арктики [Redfield, Friedman, 1964].

Из анализа приведенных данных вытекают следующие общие закономерности в распределении D и  $^{18}\text{O}$  в глубинных водах океанов [Craig, Gordon, 1965]:

1. Содержание дейтерия и кислорода-18 в океанических водах Северного полушария выше, чем в водах Южного полушария.
2. Воды Арктического бассейна весьма однородны по изотопному составу и практически не отличаются от вод Норвежского моря, но отличаются от глубоких вод Северной Атлантики.
3. Воды Атлантического океана перемешиваются в северном направлении и имеют значительные вариации изотопного состава даже в субтропических широтах северного полушария.
4. Глубинные воды Индийского и Тихого океанов весьма однородны по изотопному составу. Отмечены лишь некоторые вариации в высоких южных широтах. При этом содержание тяжёлых изотопов повышается к низким широтам.
5. Воды Тихого и Атлантического океанов и приполярные воды Антарктики весьма близки по изотопному составу.
6. В водах глубоких тихоокеанских впадин относительное содержание  $^{18}\text{O}$  примерно на 0,2% выше, чем в глубоких водах этого океана в целом.

Изотопные соотношения для поверхностных океанических вод значительно изменяются в широтном плане. Однако и в этом случае для экваториальных и умеренных широт между D и  $^{18}\text{O}$  сохраняется линейная зависимость вида  $\delta\text{D} = n\delta^{18}\text{O}$ . Значение  $n$  изменяется в зависимости от соотношения объёмов испарения и осадков для

данного региона и равно: для северной части Тихого океана – 7,5, для Северной Атлантики – 6,5, для Красного моря – 6.

Палеотемпературные исследования древних океанических осадков и ледников по изотопным отношениям  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  показали, что пределы колебания температуры поверхностных вод океанов в экваториальной зоне за последние 730 000 лет не превышали 5–6°C [Emiliani, 1978]. При этом отклонения изотопных отношений  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  воды не превышали 0,5‰ от современного уровня. Аналогичные результаты были получены на основе анализа дейтерия в глинистых минералах и кремнистых сланцах морского генезиса различного возраста. По данным Д. Имбри [Imbrie, 1985] температура поверхностного слоя океана в ледниковые эпохи снижалась только на 2°C.

Аргументы, свидетельствующие о стабильности изотопного и химического состава океанов, рассмотрены Х. Лоуэнштамом [Боуэн, 1969]. Р. Боуэн считает, что поскольку изотопный состав кислорода, концентрации  $\text{SrCO}_3$  и  $\text{Mg CO}_3$  и отношения  $\text{Sr/Ca}$  и  $\text{Mg/Ca}$  у изученных Х. Лоуэнштамом раковин ископаемых моллюсков всегда лежат в пределах величин, характерных для современных образцов, очень вероятно, что концентрация  $^{18}\text{O}$  в океанических водах оставалась постоянной по крайней мере в течение последних 250 млн лет.

Существенную роль в изменении изотопного состава вод океана могли играть эпохи оледенения. По данным, приведённым в работе [Fairbridge, 1964], общее количество воды в океане в неледниковые эпохи, например в мезозое, было на 5% больше, чем в эпохи оледенения. Если учесть, что весь избыток воды поступал за счёт таяния льдов, то можно рассчитать количество дейтерия в океане в неледниковые эпохи – оно примерно на 10‰ меньше, чем в период оледенения. По данным Р. Боуэна [1969], избыток льда в плейстоцене оценен в  $40,2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ , что соответствует увеличению объёма океана в неледниковые эпохи на 4%. По расчётам Эмилиани [Emiliani, 1970], повышенное содержание кислорода-18 в океане в ледниковые эпохи равнялось 0,5‰. При этом он исходил из предположения, что увеличение объёма льда в плейстоцене составляло  $40 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ , а средний изотопный состав кислорода льда  $\delta^{18}\text{O} = -15\text{‰}$ . Изменение концентраций дейтерия и кислорода-18 в океанских водах в процессе

смены ледниковых и неледниковых эпох составляло не более  $\pm 10\%$  по дейтерию и  $\pm 1\%$  по кислороду-18.

Основным фактором фракционирования изотопных разновидностей воды в поверхностном гидрологическом цикле является различие в давлении насыщенного пара отдельных изотопных разновидностей воды:  $p_{H_2^{16}O} > p_{H_2^{18}O} > p_{HDO}$ . В равновесных условиях коэффициент разделения изотопных разновидностей молекул воды определяется отношением давления насыщенного пара лёгкого р и тяжёлого р' компонентов:  $\alpha = p/p'$ . При температуре  $20^{\circ}\text{C}$  коэффициент для HDO и  $H_2^{18}O$  равен соответственно 1,08 и 1,009. В этом случае пар в равновесии с водой будет беднее на  $80\%$  дейтерием и на  $9\%$  кислородом-18. Изотопный состав пара  $R_n = R_B/\alpha$ . Если в качестве стандарта принята вода, то

$$\delta_n = (R_n - R_B)/R_n = 1/\alpha - 1, \quad (1)$$

а изотопный состав воды по отношению к равновесному пару (за стандарт принял пар) по аналогии будет равен

$$\delta_B = \alpha - 1. \quad (2)$$

Коэффициенты фракционирования дейтерия и кислорода-18 возрастают с понижением температуры. Зависимость коэффициента  $\alpha$  от температуры в общем виде выражается уравнением:

$$\alpha = a \exp(b/RT). \quad (3)$$

Для кислорода эта зависимость в интервале температур от  $-20$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  описывается уравнением Жаворонкова  $\alpha_{^{18}O} = 0,982 \exp(15,788/RT)$ .

Наиболее важным процессом при формировании изотопного состава атмосферных осадков является конденсация водяного пара. В замкнутой системе первое небольшое количество конденсата, очевидно, имеет изотопный состав, аналогичный изотопному составу жидкости, находящейся в равновесном состоянии с паром. При дальнейшей конденсации влаги изотопный состав конденсата  $\delta_k$  изменяется по уравнению [Dansgaard, 1964]:

$$\delta_k = (1/\alpha_O)(1/\varepsilon F_n + 1) - 1 \quad (4)$$

где  $\varepsilon = (1/\alpha) - 1$ ;  $\alpha_O$  – значение коэффициента разделения в начале процесса;  $F_n$  – оставшаяся часть пара.

При изотермическом процессе  $\alpha_O = \alpha$ . Если конденсация влаги вызвана охлаждением, то значение  $\alpha$  возрастает. При этом несконден-

сировавшаяся часть пара обедняется тяжёлыми изотопами. Изотопный состав оставшейся паровой фазы  $\delta_{\Pi}$  описывается уравнением

$$\delta_{\Pi} = (1/\alpha_O \alpha) [1/(\epsilon F_{\Pi} + 1) - 1]. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) описывают замкнутую равновесную систему. Если конденсат из паровой фазы выпадает в виде твёрдого материала, изотопного обмена между сублиматором и паровой фазой не происходит. В этом случае изотопный состав конденсата и паровой фазы описывается уравнением Рэлея [Dansgaard, 1964].

$$\delta_K = (\alpha/\alpha_0) F_n^{\alpha-1} - 1, \quad (6)$$

$$\delta_{\Pi} = (1/\alpha_0) F_n^{\alpha-1} - 1. \quad (7)$$

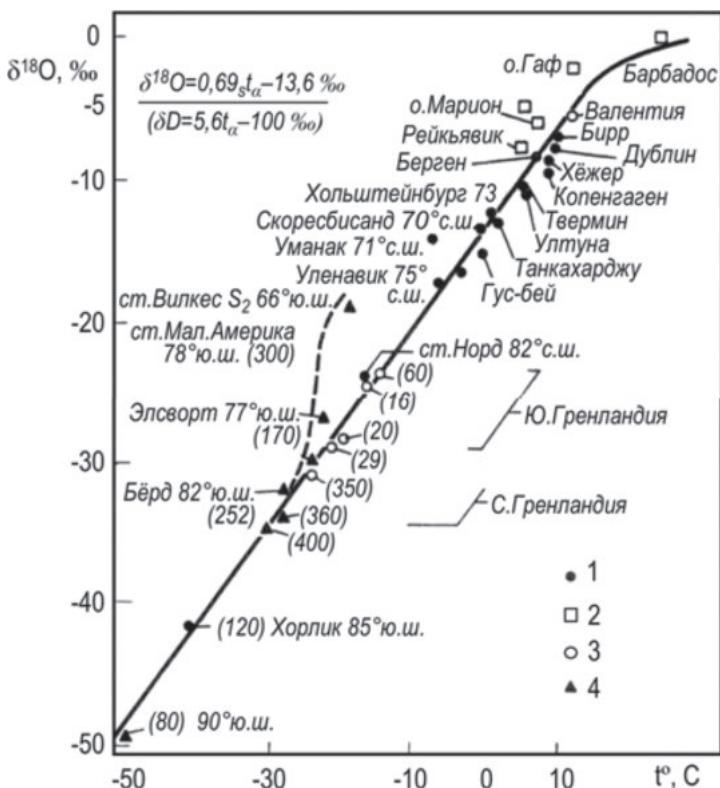


Рис. 2. Среднегодовые значения  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках как функция среднегодовых температур воздуха на поверхности земли: 1 – континентальные станции в районе Северной Атлантики; 2 – островные станции; 3 и 4 – станции Гренландии и Антарктиды. Цифры в круглых скобках обозначают общую мощность (см) исследованных слоев снега [Dansgaard, 1964]

Как видно из уравнений (6) и (7), в данном случае ещё в большей степени происходит обеднение паровой фазы тяжёлыми изотопами в процессе охлаждения системы. Логарифмируя уравнение (7) и дифференцируя по температуре  $t$ , можно получить уравнение скорости фракционирования изотопов с изменением температуры  $d\delta/dt$ . Иными словами, можно получить зависимость концентрации изотопов в осадках от температуры конденсации.

Между концентрацией изотопов кислорода-18 идейтерия в осадках и среднегодовой температурой воздуха на поверхности  $t_{\Pi}$  экспериментально установлена корреляционная зависимость [Dansgaard, 1964]. Она отмечается в очень широком диапазоне температур и выражается уравнениями:

$$\delta^{18}\text{O} = 0,695t_{\Pi} - 13,6\%, \quad (8)$$

$$\delta\text{D} = 5,6t_{\Pi} - 100\%. \quad (9)$$

Зависимость изотопного состава от среднегодовой температуры, выражаемая уравнениями (8) и (9), справедлива лишь для прибрежных районов с умеренным и холодным климатом. С удалением от моря проявляется континентальный эффект. В этом случае расчёты и экспериментальные данные иногда не совпадают. Так, для Вены среднегодовое значение  $\delta^{18}\text{O} = -9\%$ , а рассчитанное по уравнению (9), исходя из среднегодовой температуры  $9,5^{\circ}\text{C}$ , значение  $\delta^{18}\text{O} = -7\%$  [Drostetal., 1972]. В. Mook [Mook, 1970] отмечает проявление континентального эффекта даже в Голландии.

Среднегодовое значение  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках различных районов как функция среднегодовой температуры воздуха на поверхности показано на рис. 2 [Dansgaard, 1964].

На основе уравнений (8) и (9) корреляционную зависимость между содержаниемдейтерия и кислорода-18 в атмосферных осадках можно записать в общем виде:

$$\delta\text{D} = a\delta^{18}\text{O} + b. \quad (10)$$

При этом значение коэффициента  $a$  определяется из соотношения

$$\frac{d\delta\text{D}}{d\delta^{18}\text{O}} = \frac{d\delta\text{D}}{dt} / \frac{d\delta^{18}\text{O}}{dt} = \frac{5,6}{0,69} \approx 8,0.$$

Константа  $b$  в уравнении (10) характеризует степень неравновесия системы при испарении первоначальных масс океанической воды, т.е. скорость её испарения. Если бы испарение океанических вод

происходило в равновесных условиях, то константа  $b$  была бы равна нулю. Однако за счёт кинетических эффектов при испарении воды в неравновесных условиях образующийся пар обедняется кислородом-18 несколько больше, чем при равновесном испарении. Поэтому  $b \neq 0$  для многих станций значение  $b$  близко к +10‰. Однако в некоторых районах величина  $b$  отличается от 10. Так, для Средиземноморья  $b=22\%$ , для Японского архипелага  $b=17,5\%$  [Gat,Carmi,1970; Sakai,Matsubaya,1977], для Александрии  $b=15,9\%$ , Каразимира  $b=23,3\%$ , Инверсаргилля  $b=-0,3\%$  [Yurtsever,Gat,1981]. Вероятно, на величину параметра  $b$  оказывают влияние процессы конденсации осадков. Как правило, величина  $b$  уменьшается с удалением места выпадения осадков от области зарождения водяного пара (континентальный эффект). Так, для Валентии  $b \approx 10\%$ , для Вены  $b \approx 5\%$ , для Москвы  $b \approx 0$ .

Основной резервуар гидросферы – Мировой океан – содержит около 97% всей воды без учёта связанной в породах. Средняя синоптическая скорость движения воздуха в атмосфере равна 10 м/с, а среднее время влагооборота равно 11 дням. Так что процесс смешения гидросферы протекает весьма интенсивно.

Задача состоит в том, чтобы выяснить, какими величинами изотопных соотношений характеризуется водяной пар, поступающий с поверхности океанов в атмосферу, и как распределяется изотопный состав различных частей пара, из которого формируются осадки, выпадающие над океанами и континентами. В итоге задача сводится к составлению водного и изотопного баланса на генетической основе.

В настоящее время изотопный состав водорода и кислорода атмосферных осадков изучается в глобальном масштабе на сети станций МАГАТЭ/ВМО, расположенных в различных климатических районах земного шара. Эта сеть начала работу в 1961 г. и в разное время насчитывала до 180 станций (рис. 3). Сеть включает островные (сюда входят периодически действующие корабельные станции), прибрежные и континентальные станции. Данные по среднемесячному изотопному составу атмосферных осадков, среднемесячной температуре и влажности для этих станций регулярно публикуются в специальных выпусках МАГАТЭ.

Схема глобального распределения кислорода-18 в атмосферных осадках (рис.4), составленная Ю. Юртсевером и Д. Гатом [Yurtsever, Gat,



Рис. 3. Сеть станций МАГАТЭ/ВМО для отбора проб атмосферных осадков на 1971 г.

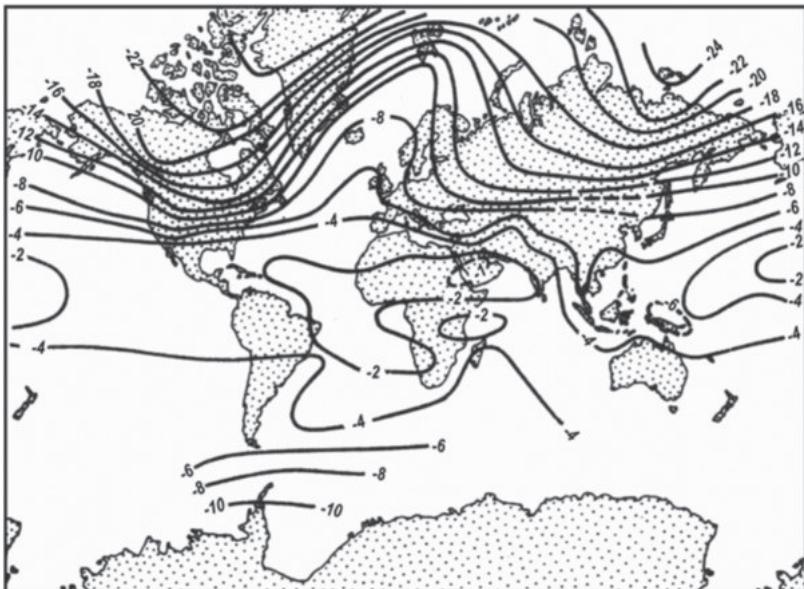


Рис. 4. Глобальное распределение  $\delta^{18}\text{O}$  в атмосферных осадках, по данным станций, имевших как минимум двухлетний непрерывный ряд наблюдений

1981] и дополненная нами данными по территории бывшего СССР, даёт общее представление о концентрациях изотопов кислорода в атмосферных осадках без учёта возможных локальных вариаций, связанных с климатическими особенностями отдельных районов.

Глобальная оценка средних изотопных соотношений водорода и кислорода для океанического пара может быть дана из условия баланса испаряющейся и выпадающей в осадках воды. Из материального баланса испарение–осадки вытекает, что  $\delta_E = \delta_P$ , т.е. при возвращении воды в океаны должен восстанавливаться её прежний изотопный состав. Если рассматривать изотопный баланс океанов в цикле испарение–осадки, то континенты в этом процессе играют незначительную роль, поскольку они получают в виде осадков всего 10% испаряющейся с поверхности океанов воды. В связи с этим Г. Крейг и Л. Гордон [Craig, Gordon, 1965] предложили рассматривать океан как замкнутую систему.

На основании фактических данных о распределении осадков, величины которых коррелируют с площадями широтных поясов,

можно принять следующие величины широтного распределения концентраций  $^{18}\text{O}$ :

Широта	Доля осадков	$\delta_{\text{cp}}^{18}\text{O}$ , ‰
0–20	0,5	−2
20–40	0,4	−5
40–90	0,1	−15

Используя эти данные, Крейг рассчитал средние величины изотопных отношений для океанического пара и осадков  $\delta^{18}\text{O} = -\%$  и  $\delta D = -22\%$ . Эти цифры близки и для средних континентальных осадков, кроме высоких широт, где указанные величины значительно ниже, но доля осадков этих районов Земли в целом невелика. По данным детальной оценки изотопного водного баланса для Северо-Американского континента [Craig, Gordon, 1965], среднее значение  $\delta^{18}\text{O} = -5\%$  и  $\delta D = -30\%$ , что согласуется с принятыми выше значениями.

Если бы испарение с поверхности океанов происходило в равновесных условиях при отсутствии эффектов кинетики и влажности атмосферы, то средние величины изотопных отношений следовало бы принять для  $\delta^{18}\text{O} = -9\%$  и для  $\delta D = -70\%$ , как это указано в работах [Epstein, Mayeda, 1953; Dansgaard, 1964].

Анализируя условия формирования изотопного состав океанических вод, небезынтересно рассмотреть данные об эволюции изотопных отношений во времени на примере антарктических льдов. С. Эпштейном и соавторами [Epstein et al., 1970] были исследованы образцы льдов при бурении в 1968 г. скважины на антарктической станции Бёрд ( $80^{\circ}01'$  ю.ш.,  $119^{\circ}31'$  з.д.), расположенной на высоте 1530 м над уровнем моря. Изотопные исследования льда проведены в интервале глубин 99–2162 м при полной глубине скважины 2164 м.

По характеру и величинам изменения изотопных отношений льда во времени авторы следующим образом интерпретируют полученные ими данные. В пределах глубин 1050–2160 м они определённо свидетельствуют о значительных климатических изменениях в прошлом. Соответствующий этим изменениям интервал времени 11 000–75 000 лет назад связывается с известным в палеоклиматологии последним периодом похолодания на Земле в плейстоцене. При этом по изменениям изотопных отношений во времени можно выделить наиболее холодные интервалы, соответствующие 17 000, 27 000, 34 000 и 40 000 лет, и более тёплые, соответствующие 25 000,

31 000 и 39 000 лет назад. Последняя фаза максимального похолода-ния (отмечена 17 000–11 000 лет назад) совпадает с окончанием Вис-консинского оледенения для Северного полушария. Аналогичные совпадения по двум полушариям наблюдаются и для других фаз похолода-ния и потепления за весь отмеченный период. Данные, характеризующие придонную часть льда, очевидно, являются сви-детелями межледникового периода с температурой выше современной для станции Бёрд, который должен был закончиться 75 000 лет назад. Данные, приведенные в работе [Emiliani, 1970], основанные на изучении изотопов кислорода ископаемых пелаги-ческих фораминифер, а также на исследовании гренландских льдов по оценке интервалов времени Висконсинского оледенения, близки к приведённым выше. Амплитуда колебания температуры между периодами оледенения и межледниковым временем составляет 7–8°C.

Аналогичные результаты получены Дансгаардом с соавторами [Dansgaard et al., 1969] при изучении колонки льда высотой 1390 м из скважины на станции Кемп Сенчури в Гренландии, а также Ф. Г. Гордиенко и В.М. Котляковым [1976] при изучении колонки льда высотой 1000 м, полученной на станции «Восток» в Антарктиде. Однако по данным Гордиенко и Котлякова колебания температуры между голоценовым временем и максимумом плейстоценового оледенения в Антарктиде составляли не 7–8, а лишь 5°C.

На российской станции «Восток» в Антарктиде в период с 1970 по 1998 гг. была пробурена скважина до глубины 3623 м и охватыва-ющая временной интервал от 0 до 420 тыс. лет. Возраст льда в верх-ней части изучаемой толщи, накопившейся за последние несколько тысяч лет, определяли путём подсчёта годовых слоев. Возраст более глубоких отложений оценивали методом численного моделирова-ния условий растекания льда. В последние годы по мере совершенно-ствования метода ускорительной масс-спектрометрии (АМС) возраст льда определяют по содержанию космогенных радионуклидов  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{26}\text{Al}$ .

Изотопный состав водорода льда в керне со станции «Восток» варьирует в пределах от –420 до –480‰. Более высокие его значения (от –420 до –460‰) отражают сравнительно короткие периоды межледниковых потеплений, а более низкие значения (от –460 до

–480%) характеризуют длительные периоды ледниковых похолоданий. До настоящего времени это пока единственная в мире скважина, охватывающая последние ледниково-межледниковые циклы: валдайскую или вюрмскую ледниковую эпоху (10–120 тыс. лет назад); микулинское или рисс–вюрмское межледниковые (120–140 тыс. лет); днепровское или рисское оледенение (140–220 тыс. лет); великий межглациал (220–320 тыс. лет); и окское или миндельское оледенение (320–420 тыс. лет). Установлено, что последняя ледниковая эпоха характеризуется тремя температурными минимумами, которые были 20, 60 и 110 тыс. лет назад. Пик межледникового периода приходится на 130 тыс. лет. Изотопные данные свидетельствуют также, что колебания температуры за последние тысячелетия достигали 1,5–2,0°C. Тёплыми были 12, 14 и 20 вв., а холодными – 12–15 и 17–19 вв. Последний интервал получил название малого ледникового периода. Это означает, что палеоклиматические вариации отражают одновременно оба полушария Земли и вероятнее всего являются следствием астрономических эффектов по теории Миланковича.

Изотопный состав естественных и искусственных водоёмов определяется рядом факторов, важнейшие из которых следующие [Gat et al., 1968; Merlivat, 1970; Fontes, 1976]:

1. Изотопный состав и количество атмосферных осадков, за счёт которых происходит непосредственное питание водоёма.
2. Изотопный состав воды поверхностных и подземных источников, а также скорость водопритока.
3. Изотопный состав паров атмосферной влаги и влажность воздуха.
4. Скорость расхода воды, вызываемая оттоком, а также процессы испарения.

Материальный баланс водоёма за время  $\Delta t$  описывается уравнением

$$\Delta V = (\Sigma I - \Sigma Q - E) \Delta t + P, \quad (11)$$

где  $\Delta V$  – изменение объёма воды;  $I$  – составляющая водопритока (поверхностного и подземного);  $Q$  – составляющая поверхностного и подземного расхода воды;  $E$  – средняя скорость испарения;  $P$  – количество осадков, выпавших за время  $\Delta t$ .

В этом случае уравнение изотопного баланса будет иметь вид:

$$R_L \Delta V + V \Delta R_L = (\Sigma R_I I - \Sigma R_Q Q - R_E E) \Delta t + R_F F, \quad (12)$$

где  $R$  – средние значения изотопных отношений в составляющих притока и расхода воды.

В уравнении (12) можно заменить значение  $R$  на  $\delta$  и оно примет вид:

$$\Delta(\delta_L V_L) \Delta t = \Sigma \delta_I I - \Sigma \delta_Q Q - \delta_E E + \delta_F F. \quad (13)$$

Как известно [Craig, Gordon, 1965; Merlivat, 1970], скорость испарения жидкости в атмосферный воздух может быть описана уравнением  $E = k(dC/dz)$ , где  $E$  – скорость испарения (поток пара с единицы поверхности жидкости)  $k$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $dC/dz$  – вертикальный градиент влажности.

Для изотопических разновидностей воды ( $H_2^{18}O$  или HDO) имеем соответственно  $E_i = k_i(dC_i/dz)$ . Значение изотопных соотношений в паре  $R_E$  в этом случае можно записать в виде:

$$R_E = \frac{k_i}{k} \frac{R_L/a - h R_a}{1 - h}, \quad (13)$$

где  $h$  – относительная влажность воздуха на высоте  $z$  от поверхности воды при заданной температуре;  $R_L$  и  $R_a$  – отношения изотопов в жидкости и атмосферном паре;  $a$  – коэффициент равновесного фракционирования.

В формуле (13) принято  $\Delta C = 1 - h$ ,  $\Delta C_i = R_i/a - h R_a$ . Обозначим  $k/k_i = k$ , тогда уравнение (13) примет вид [Gat et al., 1968]:

$$R_E = (R_L/a - h R_a)/k(1-h). \quad (14)$$

Формулы (13) и (14) позволяют судить о параметрах, которые определяют изотопный состав потока пара. Как отмечает В.С. Брезгунов [1978], эти формулы имеют реальный физический смысл лишь в том случае, когда оба потока имеют одинаковый знак, т.е. происходит испарение или конденсация воды и изотопических разновидностей молекул. Если потоки имеют различные знаки, то при оценке водного и изотопного баланса водоёмов их следует рассматривать самостоятельно.

Дополнительное, по сравнению с равновесным, фракционирование изотопов при испарении воды в атмосфере с относительной влажностью  $h$ , определяемое влажностью и параметрами турбулентной диффузии изотопных разновидностей молекул пара, Крейг и Гордон [Craig, Gordon, 1965] выражают через величину  $\Delta\varepsilon = (k/k_i - 1)(1-h)$ . При таком подходе выражение для изотопного состава потока испарения примет вид [Craig, Gordon, 1965]

$$\delta_E = \frac{\alpha^* \delta_L - h \delta_a - \varepsilon^* - \Delta \varepsilon}{(1-h) + \Delta \varepsilon}, \quad (15)$$

где  $\alpha^* = 1/\alpha$ ,  $\varepsilon^* = 1 - 1/\alpha$ ;  $\delta_L$ ,  $\delta_a$  – изотопный состав жидкости и пара.

Выражение (15) удобно использовать при составлении уравнений изотопного баланса водоёмов. Для точного определения величины  $\delta_E$  необходимо знать параметры  $\delta_L$ ,  $\delta_a$  и  $h$ , которые поддаются прямым измерениям, а также величины  $\varepsilon^*$  и  $\Delta \varepsilon$ . Значение  $\varepsilon^*$  можно рассчитать по величинам равновесных коэффициентов фракционирования изотопов при заданных температурах. Величина  $\Delta \varepsilon$  оценивалась в ряде экспериментальных и теоретических работ, что подробно рассмотрено в обзоре [Брезгуров, 1978]. По экспериментальным данным, значение  $\Delta \varepsilon_{^{18}O}$  зависит от влажности как  $\Delta \varepsilon_{^{18}O} = (1-h)16\%$ .

При постоянной влажности отношение  $\Delta \varepsilon_D / \Delta \varepsilon_{^{18}O}$  по экспериментальным данным и теоретическим расчётам, составляет от 0,5 до 0,05 [Craig, Gordon, 1965; Merlivat, 1970]. Однако в ряде экспериментов  $\Delta \varepsilon_D$  превосходит  $\Delta \varepsilon_{^{18}O}$  в 2–4 раза [Craig, Gordon, 1965; Gat, 1970]. Такое отклонение опытных и теоретических значений Крейг и Гордон связывают с дополнительным изотопным эффектом на границе жидкость – пар, который может быть обусловлен различием коэффициентов конденсации (испарения) для изотопических разновидностей молекул. Значение параметра  $k = k/k_i$  в уравнении (14), по экспериментальным данным, варьирует в пределах 1,016–1,020 для кислорода-18, а для дейтерия эта величина несколько меньше и составляет от 1,009 до 1,0136 [Merlivat, 1970].

Как следует из уравнения (13), изотопный состав пара над водоёмом в различных условиях определяется как изотопным составом испаряющейся воды, так и содержанием изотопов в атмосферной влаге. Если бы в природных условиях испарение происходило по закону Рэлеевской дистилляции, то вода и пар в любой момент времени находились бы в состоянии изотопного равновесия. В этом случае состав пара над водоёмом был бы равен  $R_E = R_L/\alpha$  (где  $R_L$  – изотопный состав водоёма ко времени  $t$ ), а изотопный состав воды при сокращении объёма водоёма в процессе испарения воды описывался бы формулой Рэлея [Бродский, 1957]

$$R_L = R_0 (V_0/V)^{\alpha-1/\alpha} = R_0 (V/V_0)^{\alpha-1/\alpha}, \quad (16)$$

где  $R_0$  и  $R_L$  – соотношение изотопов воды в водоёме при  $V=V_0$  и после сокращения его объёма;  $V_0$  и  $V$  – начальный и конечный объём воды..

При равновесном испарении значение  $\delta_L - \delta_0$  является линейной функцией  $\ln F$ . Если же при условиях равновесного процесса испарения объём водоёма остается постоянным за счёт водопритока, то изотопный состав воды в любой момент следует из уравнения [Брезгунов, 1957]

$$\ln \alpha[(\alpha-1)/(\alpha-R_0/R_L)] = V/V_0. \quad (17)$$

В случае неравновесных условий испарения, когда вступает в действие кинетический фактор (при  $20^\circ\text{C}$   $\alpha_D^k=1,09$ ;  $\alpha_{^{18}\text{O}}^k=1,025$ ), имеем

$$d\delta/d\delta^{^{18}\text{O}} \approx (\alpha_D^k - 1) \alpha_{^{18}\text{O}}^k / (\alpha_{^{18}\text{O}}^k - 1) \alpha_D^k < 8. \quad (18)$$

В стационарных условиях, когда не происходит значительных изменений объёма водоёма, изотопный состав воды при условии хорошего перемешивания стремится к постоянной величине

$$R_L = \frac{(1-h)R_I s + hR_a/k}{1/\alpha k + (1-h)(1-s)}, \quad (19)$$

где  $s$  – отношение средних скоростей водопритока и испарения.

Выражение (19) справедливо, если кратковременные изменения параметров  $\alpha$ ,  $R_I$ ,  $R_a$  позволяют принять их средние величины постоянными во времени.

Если положить, что вода из водоёма теряется только за счёт испарения, т.е.  $s=I/E=1$ , то уравнение (19) примет вид

$$R_L = \alpha^k [(1-h)R_I + h(R_a/k)]. \quad (20)$$

Если объём водоёма при испарении уменьшается, и при этом вода расходуется только на испарение и новых порций воды в водоём не поступает ( $I=0$ ), то интегрирование уравнений (11) и (12) при таких условиях даёт выражение для изотопного состава водоёма как функции  $V/V_0$ :

$$R_L = \frac{[R_0(1/\alpha k - 1 + h) - hR_\alpha/k](V/V_0)^{(1/\alpha k - 1 + h)/1-h} + hR_\alpha/k}{1/\alpha k - 1 + h}. \quad (21)$$

Уравнение (21) по структуре сходно с формулой рэлеевской дистилляции (16). Однако в данном случае учитывают кинетические факторы, влажность воздуха и изотопный состав пара атмосферной

влаги. В пересыхающих водоёмах, когда  $(V/V_0) \rightarrow 0$ , конечный изотопный состав воды может быть найден из выражения

$$R_L = \frac{h R_\alpha / k}{1/ak - 1 + h}. \quad (22)$$

В реальных условиях испарения при сохранении объёма водоёма изотопный состав оставшейся части жидкости не возрастает беспрепятственно, как это следует из уравнения Рэлея (16), а стремится к стационарному состоянию, определяемому параметрами  $\alpha$ ,  $k$ ,  $h$  и  $R_\alpha$ .

Примером взаимосвязи озёрных вод с источниками их питания и атмосферным водяным паром является распределение изотопов водорода и кислорода в бассейне бессточного озера Иссык-Куль [Брезгунов и др., 1979]. Озеро расположено в высокогорной впадине Тянь-Шанской горной системы на высоте 1600 м над уровнем моря. Его площадь составляет 6200 км<sup>2</sup> при средней глубине 280 м. В озеро впадает свыше 50 рек, стекающих с окружающих склонов гор и питающихся главным образом талыми водами ледников. Годовой сток рек составляет 4 км<sup>3</sup>, а среднее количество годовых осадков составляет 250 мм (~1,5 км<sup>3</sup>). Температура поверхностных вод озера в июле–августе равна 18–19°C, а в январе–феврале она не падает ниже +2°C.

В силу расположения Иссык-Кульской котловины общей площадью 22 000 км<sup>2</sup> с её незамерзающим озером, эту котловину можно рассматривать в качестве уникальной природной модели, в пределах которой проявляется большинство наблюдаемых закономерностей распределения стабильных изотопов водорода и кислорода, характерных для глобального кругооборота природных вод.

В.С. Брезгунов с соавторами, начиная с 1974 г., проводили систематические исследования изотопного состава озёрной и речной воды, источников подземных вод, атмосферных осадков, ледников и водяного пара котловины. На основе анализа данных об изотопном составе атмосферных осадков и водяного пара над озёрами были найдены пропорции смешения водяного пара верхних слоёв атмосферы, приносимого извне и местного «озёрного» водяного пара. Было найдено, что в западной части котловины (ст. Рыбачье) атмосферные осадки практически полностью формировались из внешнегородского водяного пара. Осадки восточной части котлови-

ны (ст. Пржевальск) содержали 20% озерного и 80% регионального пара. Максимальная доля озёрного пара (до 40%) отмечена в центральной части котловины у станций Чолпон-Ата, Покровка и Большая Кызылсу.

Изменение изотопного состава речных вод за счёт испарения можно наблюдать на примере Нила [Friedman et al., 1964]. Относительное содержание дейтерия в период паводка в речной воде у Хартума составляло – 23‰, у Каира 21‰. В меженный период эти величины соответственно равнялись +1,5‰ и +1,6‰. Отсюда следует, что на отрезке между Хартумом и Каиром (около 3000 км) Нил теряет на испарение около 3% своей воды.

Заметное обогащение грунтовых вод дейтерием и кислородом-18 за счёт испарения атмосферных осадков в процессе инфильтрации через зону аэрации наблюдается главным образом в районах с аридным климатом [Dinzer et al., 1974; Gonfiantini et al., 1976]. Изменение изотопного состава подземных вод за счёт обменных реакций в системе вода–порода для вод зоны активного водообмена практически не наблюдается.

На основе анализа изотопного состава зоны активного водообмена нашли решение такие практические задачи как: сезонное питание подземных вод; питание подземных вод в эпоху оледенения; выявление областей питания подземных вод; взаимосвязь водоносных горизонтов; оценка пропорций смешения вод различного генезиса; временные параметры водообмена в водоносной системе; исследование водного баланса сопряжённых гидрогеологических бассейнов.

С использованием природных концентраций дейтерия и кислорода-18 решались и другие гидрогеологические проблемы, такие как: выявление сезонности питания подземных вод и расчёт доли питания за счёт атмосферных осадков различных сезонов года в карстовых регионах [Dinzer, Payne., 1971]; исследование движения подземных вод в районах действующих водозаборов [Fritz et al., 1974]; идентификация поступления в водоносные горизонты современных и древних морских вод, что характерно для прибрежных районов [Salati et al., 1974; Yurtsever, Payne., 1979]. Наиболее достоверные результаты удается получить при комплексном использовании различных природных изо-

Таблица 2

**Распределение дейтерия и кислорода-18 в подземных водах территории бывшего СССР**

Район исследования	$\delta D, \text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$	Источник
Прибалтийский	-119 до -48	-18,8 до -6,3	Пельмегов и др., 1978
Припятский прогиб	-95 до +2	-12,7 до +4	Ткачук и др., 1975
Украинские Карпаты	-108 до -7	-13,1 до +3	Бабинец и др., 1971 Ветштейн и др., 1972 Поляков и др., 1974
Прикарпатские минеральные воды «Нафтуся» и «Шкло»	-102 до -6	-	Ветштейн и др., 1973
Днепровско-Донецкий	-55 до +11	-7,2 до +0,3	Ветштейн и др., 1973
Прикаспийская впадина (северо-западный борт)	-107 до -33	-10,1 до -2,4	Алексеев и др., 1975
Предкавказье	-67 до -15	-12 до +5,8	Тарасов, 1978
Азово-Кубанский	-120 до -28	-17,7 до +7	Соколовский и др., 2007
Кавказские минеральные воды	-118 до -42	-12,7 до +1,1	Селецкий и др., 1973
Сочи-Адлерский	-73 до -35	-9,8 до -0,5	Горбушина и др., 1972, 1974
Средне-Каспийский	-125 до -17	-12,4 до -2,2	Селецкий и др., 1973
Западно-Туркменский	-79 до -4	-13,4 до +4,4	Селецкий и др., 1973 Алексеев и др., 1975
Ясханская линза пресных вод	-89,2 до -54,4	-12,4 до -2,5	Селецкий и др., 1973
Грязевые вулканы Западной Туркмении	-57 до -31	-	Селецкий и др., 1973
Северный Кавказ	-115 до -28	-14,2 до +5	Алексеев и др., 1975
Московский	-114 до -22	-14,5 до -5	Соколовский и др., 1999
Ферганский	-106 до -78	-10,9 до +1,7	Селецкий и др., 1973
Амударьинский	-102 до -20	-12,3 до -6,1	Алексеев и др., 1974, 1975
Сибирская платформа	-180 до -23	-21,5 до 0,0	Пиннекер и др., 1973, 1974, 1975

топов в комбинации с гидрохимическими и гидрологическими данными.

Формирование глубоких подземных вод осадочной оболочки Земли имеет длительную и сложную историю. Глубокие воды седиментационных бассейнов формировались на месте древних морей и лагун, тяготеющих к материковым окраинам. Наблюдается непосредственная связь мощности осадочных толщ с тектоническими горизонтальными подвижками литосферных плит [Ле Пишон и др., 1977; Буллард, 1978] и как следствие этого процесса – с вертикальными тектоническими подвижками земной коры [Ферхутен и др., 1974].

Главные бассейны седиментации, образовавшиеся в различные геологические эпохи, были связаны с окраинными частями плит, т.е. с теми участками земной коры, где происходили максимальные тектонические вертикальные подвижки. Характерно, что подавляющее число открытых к 1970 г. нефтяных месторождений-гигантов связано с осадочными бассейнами, расположенными в шельфовых зонах современных материков [Муди, 1978].

Многими исследователями проведены значительные работы по изучению распределения дейтерия и кислорода-18 в глубоких подземных водах территории бывшего СССР. Результаты этих исследований в обобщённом виде представлены в табл. 2. Аналогичные исследования выполнены для большинства нефтегазовых провинций мира.

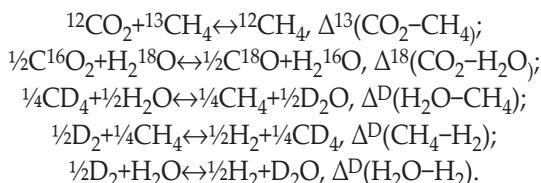
Большой интерес у исследователей вызывает изучение изотопного состава водорода и кислорода кремнистых сланцев, которые представляют собой силикатную породу, практически целиком состоящую из  $\text{SiO}_2$ .

Важную роль в эволюции изотопного состава гидросферы играли карбонатные осадки биогенного и неорганического происхождения. Изучение изотопного состава карбонатных пород необходимо для решения ряда важных проблем. После установления изотопной температурной шкалы, полученной Эпштейном с соавторами [Epstein et al., 1951; 1953; Bowen, 1991] и основанной на изотопном равновесии кислорода при формировании карбонатов в воде, в разных странах начались палеотемпературные исследования древних морей, в которых происходило образование карбонатных пород.

Многие организмы отлагают известковые скелеты в изотопном равновесии с морской водой, однако изотопный состав раковин некоторых морских организмов контролируется также кинетическими факторами, связанными с процессами метаболизма [O'Neil, 1979]. В частности, многочисленными экспериментами доказано [Боуэн, 1969; Savin, 1977], что многие моллюски и фораминиферы, панцири которых используются в палеотемпературном анализе, строят свои карбонатные оболочки в состоянии изотопного равновесия с морской водой.

По результатам изучения изотопного состава подземных вод геотермальных областей различных районов мира, таких как Лардерелло (Италия), Вайракей (Новая Зеландия), Гекла (Исландия), Карупано (Венесуэла), Йеллоустонский и Лассенский национальные парки, Стимбоут-Спринг, Солтон-Си (США), Курило-Камчатский регион (РФ) и другие, установлено, что в составе термальных вод доминируют метеорные воды. Если бы термальные воды содержали существенную долю ювенильной воды, то не наблюдалось бы разницы в их изотопном составе, а их состав был бы независимым от географического положения исследуемых вод. В данном же случае различия в изотопном составе исследуемых термальных и поверхностных вод того же местоположения говорят о тесной генетической связи термальных вод с метеорными.

В соответствии с реакцией Фишера–Тропша, в гидротермальных системах должны протекать следующие реакции изотопного обмена:



Здесь  $\Delta$  означает различие в изотопном составе компонентов А и В,  $\Delta = \delta A - \delta B \approx 10^3 \ln \alpha$ .

В работах [Panichi et al., 1977, 1979] для вычисления базовых температур по изотопному составу водяного пара, воды и растворенных газов были использованы следующие уравнения:

$$\Delta^D(\text{CH}_4 - \text{H}_2) 10^3 \ln \alpha = -90,888 + 181,269(10^6/T^2) - 8,949(10^{12}/T^4);$$

$$\Delta^D(H_2O-H_2)10^3 \ln\alpha = -201,6 + 391,5(10^3/T) - 12,9(10^6/T^2);$$

$$\Delta^{13}(CO_2-CH_4)10^3 \ln\alpha = -9,01 + 15,301(10^3/T) - 2,361(10^6/T^2);$$

$$\Delta^{18}(CO_2-H_2O_{пар})10^3 \ln\alpha = -10,55 + 9,289(10^3/T) - 2,659(10^6/T^2);$$

$$\Delta^{18}(CO_2-H_2O_{жидкость})10^3 \ln\alpha = -3,37 + 4,573(10^3/T) - 2,708(10^6/T^2).$$

Геотермометры  $\Delta^{13}(CO_2-CH_4)$ ,  $\Delta^D(CO_2-CH_4)$  и  $\Delta^D(CO_2-H_2O_{пар})$  показали базовые температуры геотермальной системы, равные  $341 \pm 37$ ,  $314 \pm 30$  и  $254 \pm 25^\circ C$  соответственно. Эти значения превосходят температуру, непосредственно измеренную на выходе из скважины ( $216 \pm 25^\circ C$ ). Гетерометр  $\Delta^{13}(H_2O-CO_2)$  в силу быстрого установления изотопного равновесия практически фиксирует температуру воды на выходе из скважины. Геотермометр  $\Delta^D(H_2O-CH_4)$  даёт трудно сопоставимые температуры, что объясняется медленным установлением изотопного равновесия в системе вода–метан, а также протеканием побочных реакций, сопровождающих реакцию изотопного обмена.

### Космогенные изотопы гидросферы

Основная роль при образовании космогенных радиоактивных изотопов принадлежит космическим лучам. Познание природы космических лучей, а также процессов, происходящих при их взаимодействии с внешней геосферой, сыграло немаловажную роль в развитии наук о Земле. В частности, решение многих гидрологических задач, связанных с динамикой природных вод, их генезисом и возрастом, стало возможным в результате изучения распределения в геосферах космогенных радиоактивных нуклидов, т.е. изотопов, генерируемых космическими лучами. В практике исследования космических лучей известны случаи регистрации частиц галактического происхождения с энергией  $10^{19}-10^{20}$  эВ.

В состав космических лучей входит около 90% протонов, 9% ядер гелия ( $\alpha$ -частиц) и 1% приходится на долю всех остальных ядер. В табл. 3 приведены данные об относительной распространенности ядер в Солнечной системе, в космическом пространстве и в космических лучах [Webber, 1967].

В области изучения состава первичных космических лучей, за исключением водорода и гелия, сделано мало. Расчёты, выполненные для оценки относительной распространенности изотопов углерода, показывают, что для первичных космических лучей  $^{13}C/^{12}C \approx 1$ .

Таблица 3

**Распространенность ядер в Солнечной системе, космическом пространстве и первичных космических лучах относительно углерода [Webber, 1967]**

Элемент	Распространенность		
	Солнечная система	Космическое пространство	Первичные космические лучи
He	?	400	38
Li	<<0,001	<<0,001	0,27
Be	<<0,001	<<0,001	0,19
B	<<0,001	<<0,001	0,43
C	1,0	1,0	1,0
N	0,16	0,27	0,46
O	1,7	2,3	0,61
F	<<0,001	<<0,001	0,09
Ne	?	0,80	0,18
Na	0,004	0,006	0,08
Mg	0,005	0,12	0,15
Al	0,004	0,005	0,03
Si	0,063	0,13	0,11
P	—	0,002	0,01
$16 \leq Z \leq 19$	0,050	0,02	0,02–0,05
Ca	—	<<0,001	0,026
Ti	—	0,006	0,017
Ci	—	0,06	0,030
Fe	—	0,06	0,080
Ni	—	0,008	0,015
$Z > 20$	—	<<0,001	0,01
$Z > 30$	—	~0,001	<0,004

Измерениями с помощью фотоэмulsionий также получено значение, близкое к единице.

Надежные измерения содержаниядейтерия в первичных космических лучах отсутствуют. В верхних слоях атмосферы (для глубины атмосферы в 2–4 г/см<sup>2</sup>) измеренное значение  $^2\text{H}/^1\text{H}=0,05–0,12$ . Большое расхождение объясняется тем, что измерения проведены для разных интервалов энергий частиц и на разных широтах. Но эти данные не противоречат спутниковым результатам ( $^2\text{H}/^1\text{H}=0,06$  или  $\epsilon=25–80$  МэВ/нукл), где эффекты земного магнетизма и атмосферы исключены.

Отношение распространенностидейтерия к распространенности протонов в Вселенной – порядка  $1,4 \cdot 10^{-4}$  [Webber, 1967], причем малую распространенностьдейтерия объясняют его распадом.

В атмосфере Солнца, согласно спектроскопическим исследованиям, отношение  $^2\text{H}/^1\text{H}$  также мало и составляет  $4 \cdot 10^{-5}$  [Kinman, 1956]. И только в атмосфере магнитных звёзд оно увеличивается до  $10^{-2}$ . Отношение распространённости  $^2\text{H}/^1\text{H} = 10^{-5}\rho$ , где  $\rho$  (част./см<sup>3</sup>) – средняя плотность вещества, через которое прошли космические лучи [Singer, 1958].

При изучении изотопного состава гелия в космических лучах [AppaRao, 1962] получено отношение  $^3\text{He}/(^3\text{He} + ^4\text{He}) = 0,20 - 0,30$  для интервала энергий  $\varepsilon = 160 - 360$  МэВ/нука. Попытки измерить это отношение для более высоких энергий положительного результата не дали.

Известны четыре вида вариаций космических лучей во времени [Fireman, 1967].

1. Вариации, связанные с 11-летним циклом солнечной активности. При этом с увеличением потока солнечных частиц интенсивность галактического излучения падает.

2. Гелиоцентрическое изменение потока галактических лучей, радиальный градиент которого в пределах 1,0–1,5 астрономических единиц (1 а.е.  $\approx 1,5 \cdot 10^8$  км) составляет  $+9,6\%$  на 1 а.е.

3. Вековые вариации излучения, обнаруженные по изменению содержания  $^{14}\text{C}$  в атмосфере в различные эпохи. Они установлены по изменению содержания  $^{14}\text{C}$  в годичных кольцах деревьев разного возраста.

4. Спорадические потоки ядерных частиц низкой энергии, выбираемые при солнечных вспышках.

Среди природных радиоактивных изотопов тритий привлекает наибольший интерес исследователей, занимающихся изучением закономерностей движения воды в природе. Тритий непосредственно входит в состав молекул воды и поэтому является её идеальным индикатором. Большое внимание к использованию трития для гидрологических и метеорологических целей особенно после испытания термоядерного оружия, когда в атмосферу было выброшено большое количество искусственно образованного изотопа. Этот бомбогенный тритий, поступавший в атмосферу в виде отдельных порций после каждого ядерного взрыва, являлся своего рода временной меткой воды, участвующей в круговороте.

Образование трития идёт при взаимодействии нейтронов средних энергий с ядрами  $^{14}\text{N}$  и при расщеплении ядер  $^{14}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}$  протонами с энергией более 100 МэВ (табл. 4).

Равновесное количество трития, генерируемого космическими лучами, составляет от 3 до 10 кг. Основная часть этого количества (~93%) содержится в гидросфере и лишь 7% – в атмосфере. Ввиду ничтожно низких концентраций трития, наблюдавшихся в природных объектах, его принято выражать в тритиевых единицах (ТЕ). Эта единица соответствует содержанию одного атома трития на  $10^{18}$  атомов протия, что эквивалентно 7,2 распадам в минуту на 1 кг воды, или 0,119 Бк/кг. Тритий – мягкий  $\beta$ -излучатель с максимальной энергией  $\beta$ -частиц, равной 18 кэВ, и периодом полураспада 12,32 года. Конечным продуктом распада трития является стабильный изотоп гелия  $^3\text{He}$ .

Таблица 4

**Реакции образования трития космическими лучами в атмосфере**

Реакция	Энергия частиц, МэВ	Сечение реакции, мбарн	Скорость образования, ат./см <sup>2</sup> , с
$^{14}\text{N}(n, ^3\text{H}) ^{12}\text{C}$	>4,4	$11 \pm 2$	0,1–0,2
$^{16}\text{O}(p, ^3\text{H}) ^{14}\text{O}$	>100	25	0,08
$^{14}\text{N}(p, ^3\text{H}) ^{12}\text{N}$			
$^{16}\text{O}(p, ^3\text{H}) ^{14}\text{O}$	10–100	–	0,01
$^{14}\text{N}(p, ^3\text{H}) ^{12}\text{N}$			
$^{14}\text{N}(p, ^3\text{H}) ^{12}\text{N}$	<10	–	0,05
N, O( $\gamma$ , $^3\text{H}$ )	–	–	$10^{-5}$

Вскоре после образования тритий окисляется и дает молекулу воды НТО. Так как массы протия и трития различны, то при переходе воды от газообразного состояния к твердому и обратно происходит фракционирование изотопов.

До первых термоядерных испытаний в атмосфере (1952 г.) основным источником поступления трития в природе было его образование за счёт космических лучей. К этому времени было произведено экспериментальное определение содержания природного трития всего в нескольких пунктах на Земле. Позднее, когда были установлены определенные закономерности распределения и выпадения на Земле соответствующих концентраций трития, стало ясно, что его содержание колеблется в значительных пределах как в про-

странстве, так и во времени. Этот предел для обоих полушарий может быть оценен в 0,1–10 ТЕ при средней скорости образования трития примерно в 30 ат./см<sup>2</sup>·мин относительно земной поверхности [Suess, 1969].

Метеоритная составляющая трития на земной поверхности ничтожно мала и составляет менее 10<sup>-5</sup> ат./см<sup>2</sup>·с. Близкими к метеорным данным оказались результаты измерения трития в лунных породах, которые были доставлены космическим аппаратами Аполлон-11 и Аполлон-12. Его концентрации составили 270–300 расп./мин·кг [Bochaler et al., 1971]. В лунных породах и метеоритах образование трития идёт при реакциях скальвания взаимодействующих протонов высоких энергий с ядрами породообразующих элементов Fe, Si, Al и др.

Другим источником поступления трития в атмосферу явились термоядерные испытания, которые начались в 1952 г. Выход трития при термоядерном взрыве оценивается от 0,7 до 5 кг на мегатонну термоядерного синтеза и 0,07 кг на мегатонну при реакциях деления [Miskel, 1973].

Первые высотные взрывы мегатонной мощности были произведены США в 1958 г. на высоте 4–7,5 км. Англия в 1957–58 гг. на меньшей высоте произвела восемь мегатонных взрывов. Часть трития от этих взрывов попала в стратосферу. Наиболее мощные мегатонные взрывы были произведены в 1961–62 гг. США и СССР в различных точках земного шара и на большой высоте. В результате в стратосфере накопилось до 400 кг трития, а его концентрация в осадках в отдельных пунктах Земли в весенне-летние месяцы достигала 10 000 ТЕ [Thatcher, Payne, 1965]. Как было выявлено в последующие годы после моратория о запрещении ядерных испытаний в трёх сферах, время пребывания трития в стратосфере, принятое по предыдущим оценкам за один год, оказалось неточным. Его концентрации в атмосферных осадках снижаются до сих пор и значительно медленнее, чем это предполагалось по расчёту. Некоторое повышение содержания трития в атмосфере наблюдалось за счёт термоядерных взрывов, производившихся Францией и Китаем. Однако величины этих тритиевых поступлений по сравнению с предыдущими незначительны.

Источником поступления трития в окружающую среду являются также предприятия атомной промышленности (энергетические

и исследовательские реакторы, заводы по переработке ядерного горючего и др.). Выход трития при делении урана в различных типах реакторов зависит от вида используемого горючего, от энергетического спектра нейтронного потока и от ряда других эксплуатационных факторов. В зависимости от типа реактора тритий образуется в результате активации нейtronами бора, лития идейтерия. В контролируемом термоядерном реакторе, над которым в настоящее время ведутся работы, тритий будет основным радионуклидом. Большая часть трития, попадающего из атомных установок в окружающую среду, в этом случае оказывается в газообразной форме ( $\text{HT}$ ,  $\text{DT}$ ,  $\text{T}_2$ ) и частично в жидкой фазе в виде НТО. Газообразный тритий, попав в атмосферу, быстро окисляется, образуя молекулы воды.

По данным, приведенным в работе [Sehgal, Rempert, 1971], при делении урана и плутония выход трития на каждые  $10^4$  актов деления составляет для  $^{235}\text{U}$  0,8 атомов, для  $^{238}\text{U}$  – 0,9 атомов и для  $^{239}\text{U}$  – 1,8 атомов. М. Фласс и Н. Дьюди [Fluss, Dudey, 1971] исследовали зависимость выхода трития при делении  $^{235}\text{U}$  от энергии нейтронов. По их данным, при изменении энергии нейтронов от 175 до 630 КэВ выход трития на  $10^4$  актов распада урана составляет от 2 до 3,4 атомов.

При делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами выход трития составляет  $8,7 \cdot 10^{-3}$  [Taylor, Peters, 1972] и при делении быстрыми нейтронами –  $2,2 \cdot 10^{-2}$  [Dudey et al., 1972]. Такая эффективность выхода соответствует образованию трития для реакторов типа ВВР и РМБК в количестве  $1,1 \cdot 10^{-2}$  Ки/сут·МВт (т) и для реакторов на быстрых нейтронах –  $2,8 \cdot 10^{-2}$  Ки/сут·МВт (т) [Голубев и др., 1979; Бродер и др., 1979].

При реакциях на боре, который содержится в управляющих стержнях реакторов, тритий выделяется по реакциям  $^{10}\text{B}(\alpha, 2\alpha)^3\text{H}$ ;  $^{11}\text{B}(n, ^3\text{H})^9\text{B}$ ;  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}(n, n\alpha)^3\text{H}$ . Сечения взаимодействия этих реакций возрастают с ростом энергии нейтронов. Поэтому выход трития в реакторах на быстрых нейтронах значительно выше, чем в других типах реакторов. По данным [Lokante, 1971], для водо-водяного реактора мощностью 3500 МВт выход трития от реакций деления за год составил 11 000 Ки и от реакций на боре – 3900 Ки. Выход трития из тепловыделяющих элементов в теплоноситель существен-

но зависит от материала оболочки. Оболочка из нержавеющей стали пропускает до 60–80% образовавшегося трития, а циркониевая оболочка – лишь 0,1% [Lokante, 1971].

К настоящему времени общее количество трития на Земле оценивается величиной от 50 до 150 кг. Следовательно, роль космогенного трития в формировании изотопного состава природных вод остаётся незначительной.

В гидрологическом цикле источником трития является стратосфера, а резервуаром для его стока – глубокие подземные воды, глубинные океанические воды и многолетние ледники, где происходит его радиоактивный распад. Отсюда следует ожидать, что должны наблюдаться определённые закономерности распределения трития во всех звеньях гидросферы.

Помимо воды, которая является основным объектом исследований распределения трития на Земле, существуют ещё два водородсодержащих соединения – молекулярный водород  $\text{H}_2$  и метан  $\text{CH}_4$ . Концентрация молекулярного водорода в индустриальных районах в настоящее время составляет  $0,575 \times 10^{-6}$  для Северного полушария и  $0,550 \times 10^{-6}$  для Южного [Schmidt, 1974]. В глобальном масштабе 50% молекулярного водорода имеет антропогенное происхождение. Наиболее мощным естественным источником  $\text{H}_2$  являются биохимические процессы, происходящие в океанах, при которых вода втрое пересыщается водородом. Значительный вклад в образование  $\text{H}_2$  дают процессы диссоциации молекул воды и фотосинтеза водорода, происходящие в атмосфере [Романов, Кикичев, 1979].

Из трития, образованного космическими лучами, лишь 0,1% находится в форме НТ и 99,9% – в форме НТО. Основное количество молекул НТ образуется на высоте 10–40 км. При взрыве термоядерного устройства, кроме выброса трития, имеющегося в самом устройстве, основной реакцией образования трития является  $\text{D}+\text{D} \rightarrow \text{T}+\text{H}+4 \text{ МэВ}$ .

Природный тритий используют в качестве индикатора для изучения закономерностей циркуляции воздушных масс в атмосфере, образования атмосферных осадков и формирования поверхностного и подземного стока воды на континентах. Для этих целей подходят фактические экспериментальные данные многолетних наблюдений за выпадениями трития в атмосферных осадках в глобальном

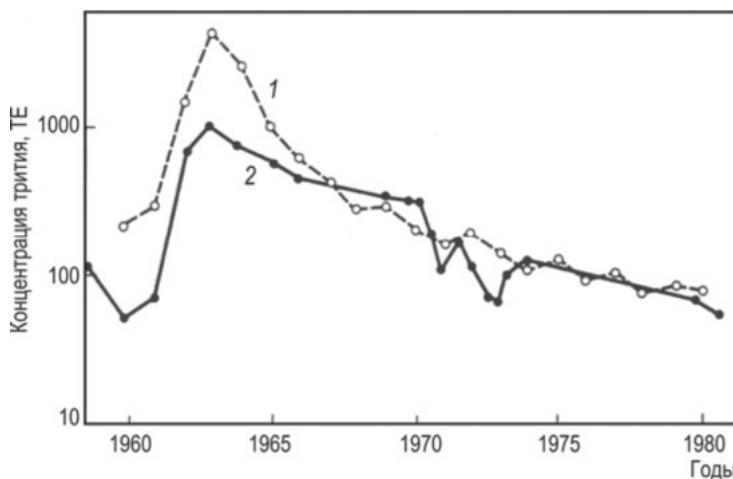


Рис. 5. Среднегодовое распределение концентрации трития в атмосферных осадках над территорией Москвы (1) и в воде р. Москвы (2) за 1958–81 гг.

масштабе. Эта работа была начата в 1961 г. Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в содружестве с Всемирной метеорологической организацией (ВМО).

В 1966 г. в связи с осуществлением программы Международного гидрологического десятилетия ЮНЕСКО в сеть станций МАГАТЭ/ВМО были включены дополнительные пункты по отбору проб из рек. Однако большую часть рек не удалось покрыть наблюдательными пунктами. К 1980 г. наблюдательная сеть по измерению трития насчитывала уже более 200 станций. Программа тритиевых измерений в осадках продолжается и поныне.

Максимальные среднегодовые концентрации трития в это время в районе Москвы достигли 3900 ТЕ (рис. 5). После прекращения термоядерных испытаний запас стратосферного трития постепенно убывал с периодом полуыведения 1,2 года примерно до 1967–68 гг., затем падение концентрации замедлилось. В течение 1969–74 гг. период полуыведения составил уже 3 года. Эта величина получена нами для большой территории, и поэтому описание распределения трития с помощью уравнений кинетики первого порядка здесь не применимо.

Глобальное распределение трития в атмосферных осадках кроме общих закономерностей, которым оно подчиняется, отмечается и

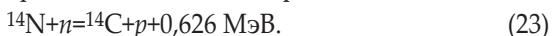
рядом региональных особенностей. Анализ этих особенностей дан в работах [Thatcher, Payne, 1965; Романов, 1978, Ферронский, Поляков, 2009].

Систематические исследования по изучению распределения трития в атмосферных осадках над территорией СССР были начаты со второй половины 1969 г. Госкомгидрометом СССР и Институтом водных проблем АН СССР. В то время в европейской части страны отбор проб производился на 18 и в азиатской части на 19 станциях. Результаты измерения содержания трития в осадках были опубликованы в сводных сборниках данных, получаемых на международной сети станций. Многолетнее распределение концентрации трития в атмосферных осадках над территорией бывшего СССР имеет картину, сходную с картиной для Центральной Европы. Общее уменьшение среднегодовых концентраций над территорией СССР к концу 1980-х гг., не учитывая временных максимумов 1975 и 1978 гг., описывается уравнением  $C = 2,26 \exp(-0,096t)$ , где  $C$  – отношение концентрации трития для данного года к концентрации для 1979 г. Коэффициент корреляции этого уравнения равен 0,96.

Исследованы также условия распределения трития в океане, поверхностных водах суши, подземных водах и методы использования этого природного индикатора для решения практических задач гидрологии и гидроэкологии.

Углерод играет одну из важнейших ролей в геохимических процессах формирования верхней оболочки Земли и в первую очередь при формировании осадочной оболочки планеты и эволюции биосфера. Радиоактивный изотоп углерода  $^{14}\text{C}$  широко используется в качестве природной метки при изучении круговорота углерода на земном шаре, при перераспределении его между природными резервуарами, а также при исследовании динамики водных масс в различных звеньях гидросферы. Большое значение в современной геологии приобретает возможность определения по радиоуглероду возраста различных геологических формаций, в том числе подземных вод, в пределах временной шкалы от 0 до 60 000 лет.

Как уже отмечалось, радиоуглерод образуется в атмосфере при взаимодействии вторичных нейтронов, генерируемых космическими лучами, главным образом, с азотом-14 по реакции



Эта экзотермическая реакция имеет сечение  $1,81 \pm 0,5$  барн. В табл. 5 приведены также и другие реакции, ведущие к образованию радиоуглерода, однако их вклад в общий баланс  $^{14}\text{C}$  ничтожен по сравнению с реакцией (23).

Таблица 5

**Реакции образования радиоуглерода в атмосфере под действием вторичных нейтронов**

Реакции	Энергия образования, МэВ	Относительная распространённость изотопа	Относительная скорость образования в атмосфере
$^{13}\text{C} (n, \gamma) ^{14}\text{C}$	+8,17	$0,23 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
$^{14}\text{N} (n, p) ^{14}\text{C}$	+0,626	1,0	1,0
$^{15}\text{N} (n, d) ^{14}\text{C}$	-7,98	$0,37 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$
$^{16}\text{O} (n, ^3\text{He}) ^{14}\text{C}$	-14,6	0,269	$2,7 \cdot 10^{-3}$
$^{17}\text{O} (n, \gamma) ^{14}\text{C}$	+1,02	$0,99 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
$^{20}\text{Ne}, ^{21}\text{Ne}$ (расщепление) $^{14}\text{C} -$		$0,12 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$

Образовавшийся в верхних слоях атмосферы радиоуглерод в течение нескольких часов окисляется до  $^{14}\text{CO}_2$  и участвует в общем глобальном круговороте углекислого газа. Общее равновесное количество радиоактивного углерода на Земле можно подсчитать теоретически. По расчётом Либби [Libby, 1965], оно составляет 81 т, а поданным Лала и других исследователей – 60–65 т, что эквивалентно суммарной активности, равной примерно  $3 \cdot 10^8$  Ки. Несмотря на то, что плотности потока вторичных нейтронов от экватора к полюсам возрастают до 3,5 раза,  $^{14}\text{C}$  распределяется на Земле достаточно равномерно, что указывает на быстрое перемешивание атмосферы.

Некоторое количество  $^{14}\text{C}$  может поступать на Землю с метеоритным веществом, где он образуется в результате взаимодействия космических лучей с минералами метеоритов. Исследование лунного грунта показало, что содержание углерода в образце №14163 составило  $109 \pm 12$  г/т ( $109 \pm 12$  ppm с учётом поправки на земное загрязнение [Fireman & Stoener, 1982]). Активность радиоуглерода, выделенного из двух фракций грунта путём прокаливания в токе кислорода при  $T=1000^\circ\text{C}$ , составляет  $31,2 \pm 2,0$  расп.·мин $^{-1}$ /кг для фракции более 53 мкм и  $11,2 \pm 2,0$  расп.·мин $^{-1}$ /кг для фракции не менее 53 мкм.

Для изучения динамики обмена углеродом между различными природными резервуарами с использованием  $^{14}\text{C}$ , а также при теоретических исследованиях перераспределения радиоуглерода между природными резервуарами число таких резервуаров (боксов) выбирают произвольно от одного [Gray, Damon, 1970] до шести [Keeling, 1973]. Большинство же исследований выполнено на двух- и трёхбоксовых моделях [Keeling, 1972].

Естественные вариации  $^{14}\text{C}$  можно подразделить на короткопериодические, обусловленные модуляцией галактических космических лучей Солнцем, и долгопериодические, связанные с изменением геомагнитного поля Земли и климата [Дергачев, Кочаров, 1977; Sternberg, Damon, 1979]. Долговременные изменения уровня  $^{14}\text{C}$  могут быть обусловлены также корпускулярным излучением от вспышек сверхновых. В последнее время большое внимание уделяется вековому (80–90-летнему) циклу солнечных пятен. Установить период векового цикла достаточно сложно ввиду малой продолжительности надёжных наблюдений за числом пятен (~230 лет). Тем не менее удалось методом исключения 11-летних и более длительных циклов продолжительностью до 44 лет оценить период векового цикла, который составляет примерно 80 лет. Расчёты показывают, что для 11-летнего цикла солнечной активности амплитуда изменения удельной активности  $^{14}\text{C}$  составляет около 5%, а для векового цикла – примерно 1%. Регистрация 11-летнего изменения содержания радиоуглерода в годичных колышах деревьев – весьма сложная задача, требующая очень точной аппаратуры. Общая активность  $^{14}\text{C}$  падает с 1840 по 1890 г. в среднем на 0,03% в год.

Радиоуглерод поступает в океаны в результате процессов обмена углерода между растворёнными карбонатными компонентами морской воды и атмосферной двуокисью углерода. В океане радиоуглерод сравнительно быстро распределяется в перемешиваемом слое ( $h \approx 100$  м,  $r \approx 10\text{--}15$  годам). Оттуда за счёт вихревой диффузии и седиментации пелагических карбонатных осадков биогенного происхождения он поступает в глубокие слои воды, в которых среднее время его пребывания ( $r$ ), по оценкам различных авторов, составляет 1500–2000 лет. Как отметил Крейг [Craig, 1957], обмен  $\text{CO}_2$  между атмосферой и океаном должен сопровождаться изотопными эффектами. Средний изотопный состав стабильного углерода рас-

творённых гидрокарбонатов морской воды имеет значение  $\delta^{13}\text{C} = -7\%$  (все данные здесь и далее приводятся относительно стандарта PDB). В результате обменных процессов происходит утяжеление углерода гидрокарбонатов до  $\sim 7\%$ . Обогащение океанических вод изотопом  $^{13}\text{C}$  можно выразить через коэффициент разделения  $\alpha_{13\text{C}} = R_0/R_a$ , где  $R_0$  и  $R_a$  – отношение изотопов углерода  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  в океане и атмосфере. Значения  $R$  представим в виде  $(1 + \delta^{13}\text{C}/1000)$ . Тогда формула для коэффициента  $\alpha$  перепишется в виде:

$$\alpha_{13\text{C}} = \frac{1 + \delta^{13}\text{C}_0/1000}{1 + \delta^{13}\text{C}_a/1000}.$$

По аналогии для углерода-14 имеем

$$\alpha_{14\text{C}} = \frac{1 + \delta^{14}\text{C}_0/1000}{1 + \delta^{14}\text{C}_a/1000} = \frac{(^{14}\text{C}/^{13}\text{C})_0}{(^{14}\text{C}/^{13}\text{C})_a}.$$

Константа разделения увеличивается в квадратичной зависимости с добавлением каждого нейтрона к изотопическому ядру. Тогда  $\alpha_{14\text{C}} = \alpha_{13\text{C}}^2$ . Принимая  $(1+x)^2 = 1+2x$  при  $x \ll 1$ , получим

$$\alpha_{14\text{C}} = \frac{1 + \delta^{14}\text{C}_0/1000}{1 + \delta^{14}\text{C}_a/1000} = \frac{1 + 2\delta^{13}\text{C}_0/1000}{1 + 2\delta^{13}\text{C}_a/1000}. \quad (24)$$

Пользуясь последним соотношением, можно показать, что если бикарбонаты океанической воды обогащены  $^{13}\text{C}$  на  $7\%$ , то для  $^{14}\text{C}$  это обогащение должно составить примерно  $14\%$ . Иными словами,  $\varepsilon_{14\text{C}} = 2\varepsilon_{13\text{C}}$ , где  $\varepsilon_{13\text{C}} = \delta^{13}\text{C}_0 - \delta^{13}\text{C}_a$ .

Таким образом, теоретическое рассмотрение вопроса обмена  $\text{CO}_2$  между атмосферой и океаном показывает, что углерод поверхностных вод океана должен быть обогащён изотопом  $^{14}\text{C}$  примерно на  $14\%$  по сравнению с углеродом атмосферы. Аналогично можно показать, что биосфера по сравнению с атмосферой должна иметь дефицит  $^{14}\text{C}$ , равный примерно  $3\%$  ( $\delta^{13}\text{C}_a = -25\%$ ). Для унификации всех радиоуглеродных измерений, как указывалось выше, производят нормализацию содержания  $^{14}\text{C}$  (в исследуемых образцах на  $-25\%$ ). Было показано, в частности, что гидрокарбонаты перемешиваемого слоя Атлантического, Индийского и Тихого океанов севернее  $40^\circ$  ю.ш. имеют практически постоянное содержание  $^{14}\text{C}$ , близкое (без изотопной коррекции) к его содержанию в биосфере [Suess, 1967].

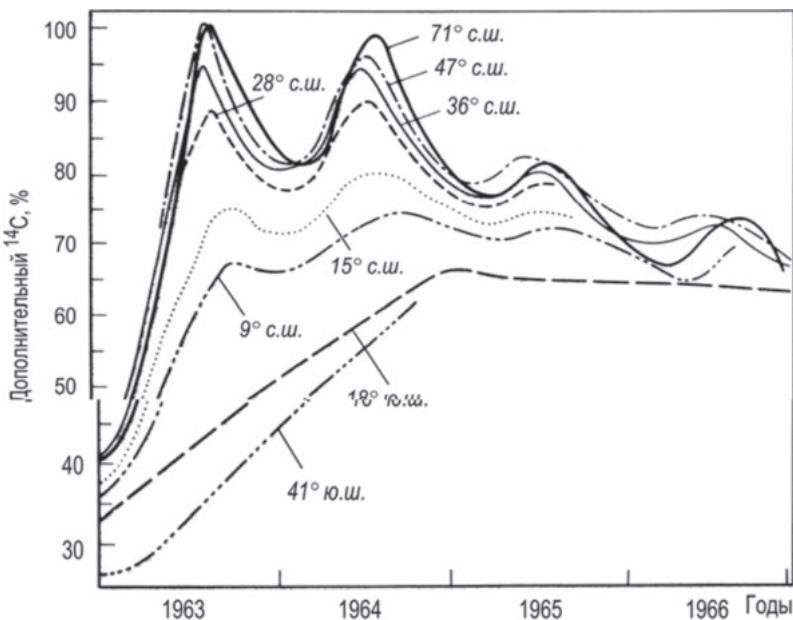


Рис. 6. Изменение концентрации  $^{14}\text{C}$  в тропосферном  $\text{CO}_2$  во времени [Fairhall, Young, 1970]

В настоящее время накоплен большой фактический материал по датированию раковин моллюсков, обитавших в водах нормальной морской солёности. Исследование образцов, отобранных с середины 19 в. до 1950 г. в прибрежных частях различных океанов, даёт основание сделать вывод о том, что содержание радиоуглерода в перемешиваемом слое океанской воды (без изотопной коррекции) в дотермоядерную эпоху было также несколько ниже биогенного уровня, определяемого как 0,95 активности щавелевой кислоты NBS. Поданным Джилеспии Полака [Gillespie, Polach, 1979], изучавших распределение радиоуглерода в раковинах моллюсков из прибрежных вод различных океанов за период 1840–1950 гг., можно сделать вывод, что содержание радиоуглерода в перемешиваемом слое могло варьировать в естественных условиях в пределах от +8 до -11% от современного стандарта. В среднем углерод обеднен  $^{14}\text{C}$  (без коррекции) примерно на 15.

Поданным различных авторов [Fairhall, Young, 1970], в времена ядерных испытаний в атмосферу Земли было выброшено до  $6 \cdot 10^{28}$  атомов  $^{14}\text{C}$ .

Поскольку до ядерных испытаний содержание  $^{14}\text{C}$  в атмосфере оценивалось величиной  $4,1 \cdot 10^{28}$  атомов, то, следовательно, вместе с бомбовым  $^{14}\text{C}$  содержание его возросло в 2,5 раза. По отношению к общему равновесному содержанию на Земле бомбовый  $^{14}\text{C}$  составляет 2,5%.

Были предприняты многочисленные экспериментальные исследования (до тысячи образцов) по измерению содержания  $^{14}\text{C}$  в тропосфере и стратосфере как в широтном, так и меридиональном направлениях [Fairhall, Young, 1970; Mynnich, Vogel, 1963; Fairhalletal., 1969; Hagemann et al., 1959]. На рис. 6 представлены наиболее характерные результаты этих исследований, обобщённые, по данным различных авторов, для тропосферного  $\text{CO}_2$  с 1963 по 1966 г.

На рисунке видны чёткие сезонные вариации концентрации  $^{14}\text{C}$  в Северном полушарии и значительный широтный градиент изменения концентрации в 1963 г. Однако этот градиент быстро падал и к 1967 г. снизился почти до нуля. Оба эти эффекта являются следствием сезонных вариаций поступления бомбового  $^{14}\text{C}$  из стратосферы в тропосферу и меридионального смешения тропосферы. Наиболее интенсивные поступления  $^{14}\text{C}$  в тропосферу, как и для трития, отмечаются весной и ранним летом. В это время происходит наиболее эффективное его смешивание в меридиональном направлении.

Уменьшение содержания бомбового  $^{14}\text{C}$  в атмосфере происходит за счёт поглощения его земной биосферой и обмена  $\text{CO}_2$  атмосферы и поверхности океанов. Последний источник наиболее важный, поскольку более 80% атмосферного  $\text{CO}_2$  ежегодно обменивается с океаническими водами и около 20% обращается через континентальную биосферу. Учитывая роль океана в поглощении бомбового  $^{14}\text{C}$ , были предприняты исследования по измерению содержания  $^{14}\text{C}$  в океанических поверхностных и глубинных водах [Bien, Suess, 1967; Nydal, 1967; Fairhalletal., 1969]. Вотличие от атмосферы, где смешение  $^{14}\text{C}$  происходит относительно быстро (менее чем за десять лет), процесс смешения в океане более длительный и сложный. Радиоуглеродный метод оказался весьма эффективным для изучения таких океанографических процессов, как смешение океанических вод и их глубинная циркуляция.

На основе исследования закономерностей распределения радиоуглерода в природных водах разработан метод их радиоуглеродного датирования, который широко используется в практике.

Кроме трития и радиоуглерода, в исследованиях природных вод гидросферы находят применение и другие космогенные изотопы. В результате реакций расщепления ядер неона образуются изотопы  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{Be}$ ,  ${}^3\text{H}$  и др. Но выход изотопов при этих реакциях ниже, чем при реакциях расщепления аргона. Кроме кого, в атмосфере отношение концентраций  $\text{Ne}/\text{Ar}=0,02$ . Содержание криптона и ксенона в атмосфере ещё ниже, и вкладом космогенных изотопов от реакций на этих элементах можно пренебречь. При этом лишь реакции  $(n, \gamma)$  на ядрах  ${}^{80}\text{Kr}$ ,  ${}^{84}\text{Kr}$  и  ${}^{132}\text{Xe}$  могут служить источником очень небольших количеств  ${}^{81}\text{Kr}(T_{1/2}=2,1 \cdot 105 \text{ лет})$ ,  ${}^{85}\text{Kr}(T_{1/2}=10,8 \text{ лет})$  и  ${}^{133}\text{Xe}(T_{1/2}=5,3 \text{ сут})$ . Ориентировочная оценка выхода космогенного  ${}^{81}\text{Kr}$  в реакции  $(n, \gamma)$  дает значение, равное  $3 \cdot 10^{-7} \text{ ат}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ .

Исследования содержания натрия в верхней атмосфере показывают, что на высоте около 80 км присутствует лишь атмосферный натрий в количестве примерно  $10^{10} \text{ ат}/\text{см}^2$ . Сечение реакции  ${}^{23}\text{Na}(n, 2n) {}^{22}\text{Na}$  составляет примерно 10 мбарн. В этом случае скорость образования  ${}^{22}\text{Na}$  составит около  $10^{-5}-10^{-6} \text{ ат}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ . Хотя в нижних слоях атмосферы плотность  ${}^{23}\text{Na}$  на несколько порядков выше, но за счёт уменьшения интенсивности потока космических лучей скорость генерации  ${}^{22}\text{Na}$  здесь оказывается того же порядка, что и в верхних слоях атмосферы.

Были проведены систематические измерения (1960–73 гг.) концентраций  ${}^{22}\text{Na}$  и  ${}^7\text{Be}$  в атмосферном воздухе и в выпадениях в Прибалтике, в районах Вильнюса [Луянас и др., 1975] и Ленинграда [Гритченко и др., 1975]. На этой основе был выявлен ряд общих закономерностей изменения концентраций исследуемых изотопов во времени, которые являются общими для всех космогенных изотопов. В том числе установлен сезонный характер изменения концентраций  ${}^{22}\text{Na}$  и  ${}^7\text{Be}$  с весенне-летним максимумом и осенне-зимним минимумом. Максимальные многолетние концентрации, связанные с термоядерными испытаниями, зарегистрированы в 1963 г.

Было найдено, что в 1962–63 гг. в результате термоядерных испытаний в стратосфере образовались значительные запасы  ${}^{22}\text{Na}$ , и его выпадения в 1962–66 гг. во много раз превышали выпадения  ${}^{22}\text{Na}$  космогенного происхождения. Из приведённых данных можно оценить период полувыведения  ${}^{22}\text{Na}$  из стратосферы, который в данном случае составляет 9,6 мес. и около 12 мес.

В описываемых опытах максимум концентрации  $^{7}\text{Be}$ , равный 79 ат./г воздуха, был получен в конце мая 1965 г., а минимум, равный около 2,7 ат./г воздуха, – в январе 1971 г.

Ряд приведённых выше космогенных изотопов нашёл применение для датирования природных вод. Значительные успехи достигнуты в исследовании долгоживущих космогенных изотопов, таких как  $^{10}\text{Be}$  (период полураспада  $1,6 \cdot 10^6$  лет),  $^{26}\text{Al}$  ( $7,16 \cdot 10^5$  лет),  $^{36}\text{Cl}$  ( $3,01 \cdot 10^5$  лет)  $^{129}\text{I}$  ( $1,57 \cdot 10^7$  лет). Эти изотопы уже находят применение в исследовании условий и скорости накопления донных осадков в водохранилищах, озёрах и океане, а также для датирования древних подземных вод [Fröhlich et al., 1977; Lehrman, 1993; Bentley et al., 1986; Кочаров, 1975; Lal et al., 1970; Möller, Wagner, 1967; Alder et al., 1967].

### Образование и распределение радиогенных изотопов

В настоящее время в земной коре известно более двадцати долгоживущих радиоактивных изотопов тяжёлых элементов с очень большим периодом полураспада, которые были свидетелями тех гигантских по масштабам процессов, которые привели к образованию химических элементов в нашей Галактике. В табл. 6 приведены основные характеристики этих изотопов. Вследствие значительных трудностей, связанных с выделением и измерением ультрамалых количеств радиоактивных изотопов, при датировании геологических объектов наиболее интенсивно используются  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  и изотопы уран-ториевых рядов. Наибольший интерес среди них представляют элементы уран-ториевых рядов (номера 81–92 в периодической системе элементов).

Испытывая многочисленные последовательные превращения, эти элементы образуют три ряда радиоактивных изотопов. Существование в природе этих трёх рядов определяется наличием родоначального элемента, с периодом полураспада сравнимым с возрастом Земли. В уран-радиевом ряду таковым является изотоп урана с массовым числом 238 и периодом полураспада  $4,51 \cdot 10^{10}$  лет. Уран-235 с периодом полураспада  $7,13 \cdot 10^8$  лет служит родоначальником собственного ряда, известного в ранних работах как ряд актиноурана. Торий-232 с периодом полураспада  $1,39 \cdot 10^{10}$  лет – родоначальный элемент в ториевом ряду. Конечными продуктами в каждом ряду пре-

Таблица 6  
Долгоживущие радиоактивные изотопы [Войткевич, 1961]

Материнский элемент	Дочерний элемент или конечный изотоп радиоактивного семейства	Период полу распада	Тип распад	Относительная распространённость, %
<sup>40</sup> K	<sup>40</sup> Ar	1,3·10 <sup>9</sup>	β (88%)	0,0118
	<sup>40</sup> Ca	1,3·10 <sup>9</sup>	K-захват (12%)	0,0118
<sup>50</sup> V	<sup>50</sup> Ti	6,0·10 <sup>15</sup>	K-захват	0,24
	<sup>50</sup> Cr	6,0·10 <sup>15</sup>	β	0,24
<sup>87</sup> Rb	<sup>87</sup> Sr	4,7·10 <sup>10</sup>	β	27,85
<sup>115</sup> In	<sup>115</sup> Sn	5,9·10 <sup>14</sup>	β	95,67
<sup>123</sup> Te	<sup>123</sup> Sb	1,2·10 <sup>13</sup>	K-захват	0,87
<sup>138</sup> La	<sup>138</sup> Ba	1,1·10 <sup>11</sup>	K-захват (70%)	0,089
	<sup>138</sup> Ce	1,1·10 <sup>11</sup>	β (30%)	0,089
<sup>142</sup> Ce	<sup>138</sup> Ba	5,0·10 <sup>15</sup>	α	11,7
<sup>144</sup> Nd	<sup>140</sup> Ce	2,4·10 <sup>15</sup>	α	23,8
<sup>147</sup> Sm	<sup>143</sup> Nd	1,0·10 <sup>11</sup>	α	15,1
<sup>148</sup> Sm	<sup>144</sup> Nd	1,2·10 <sup>13</sup>	α	11,35
<sup>149</sup> Sm	<sup>145</sup> Nd	4,0·10 <sup>14</sup>	α	14,0
<sup>152</sup> Gd	<sup>148</sup> Sm	1,1·10 <sup>14</sup>	α	0,205
<sup>156</sup> Dy	<sup>152</sup> Gd	2,0·10 <sup>14</sup>	α	0,057
<sup>174</sup> Hf	<sup>170</sup> Yb	4,3·10 <sup>15</sup>	α	0,163
<sup>176</sup> Lu	<sup>176</sup> Hf	2,2·10 <sup>10</sup>	β	2,588
<sup>187</sup> Re	<sup>187</sup> Os	4,0·10 <sup>10</sup>	β	62,93
<sup>190</sup> Pt	<sup>186</sup> Os	7,0·10 <sup>11</sup>	α	0,0127
<sup>207</sup> Pb	<sup>200</sup> Hg	1,4·10 <sup>17</sup>	α	1,4
<sup>232</sup> Th	<sup>208</sup> Pb	1,39·10 <sup>10</sup>	6α+4β	100
<sup>235</sup> U	<sup>207</sup> Pb	7,1·10 <sup>8</sup>	7α+4β	0,715
<sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb	4,51·10 <sup>10</sup>	8α+6β	99,28

вращений являются стабильные изотопы свинца, соответственно <sup>208</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb. Если бы в природных процессах не происходило разделяние элементов и изотопов, то ряды находились бы в состоянии радиоактивного равновесия, и содержание каждого элемента строго определялось бы содержанием родоначальника соответствующего ряда в соответствии с уравнением радиоактивного равновесия.

Содержание урана и тория – родоначальников радиоактивных рядов – в природных водах определяется их содержанием и распределением в горных породах. В табл.8 приведены их содержания в

основных типах пород и в каменных метеоритах, по В.В. Чердынцеву [1969].

Таблица 7

**Содержание урана и тория в породах и каменных метеоритах**

Порода	Содержание, $10^{-6}$ , г/г		
	U	Th	Th/U
Базальты	0,59	2,7	4,6
Габбро	0,96	3,9	4,0
Извещенные породы земной коры (средние значения)	1,5	5,4	3,6
Гранодиориты	2,0	7,8	3,9
Граниты	3,0	13	4,3
Осадочные породы	3,0	13,3	4,4
Почвы	2,9	9,0	3,2
Каменные метеориты (хондриты)	0,006–0,03	0,03–0,08	4,0

Из всех радиоэлементов уран-ториевых рядов наиболее полные сведения по содержанию в природных водах имеются для урана и радия; значительно меньше – для тория-232, урана-234, радона; незначительные – для изотопов тория,  $^{230}\text{Th}$  и  $^{228}\text{Th}$ . Имеются единичные данные по содержанию протактиния, мезотория, полония, радиоактивного свинца-210. Всё это определяется значительными методическими трудностями по выделению и определению малых количеств изотопов тяжёлых радиоэлементов. При определении изотопного состава приходится концентрировать радиоэлементы из больших объёмов воды (порядка сотен литров), как правило, в полевых условиях. Лишь для определения содержания урана достаточно 1 л воды. Этим главным образом и объясняется обилие данных по содержанию урана-238 в гидросфере.

Среднее содержание урана в атмосферных осадках, по А.И. Германову [Виноградов, 1963] составляет  $2\text{--}3 \cdot 10^{-8}$  г/л. Основные поставщики урана в атмосферные осадки – частицы пыли. Поэтому содержание урана в осадках существенно зависит от региональных климатических условий. Дождевые воды аридных областей, где в атмосферу поступает масса пыли, содержат больше урана ( $n \cdot 10^{-8}\text{--}2 \cdot 10^{-6}$  г/л). В атмосферных выпадениях г. Вильнюса [Стыро и др., 1970] концентрация урана достигала  $73,3 \cdot 10^{-6}$  г/л. Корреляция высоких содержаний урана с присутствием  $^{239}\text{Pu}$  (типично техногенного изотопа в атмос-

ферных выпадениях) указывает на техногенную природу урана. Высокие концентрации урана наблюдаются в зимние месяцы. Выпадения урана-238 летом носят локальный характер и обусловлены выдуванием пыли из почв близлежащих районов. Концентрации урана в выпадениях в этот период уменьшаются.

В реках (по Германову) содержание растворённого урана изменяется от  $3 \cdot 10^{-8}$  до  $n \cdot 10^{-5}$  г/л при среднем значении около  $1 \cdot 10^{-6}$  г/л. Большое влияние на содержание урана оказывают климатические условия. Для рек аридных регионов общая минерализация и содержание урана выше по сравнению с реками гумидных регионов. Вниз по течению некоторых рек (Днепра, Дона, Волги, Сырдарьи, Амударьи) содержание урана увеличивается.

В районах месторождений урана его содержание в водах малых рек и ручьёв повышается до  $n \cdot 10^{-4}$  г/л. Вопрос о миграции урана в речной воде подробно рассмотрен в работах Г.Н. Батурина и А.Л. Коченова [1968; 1969]. Они проводили комплексные исследования по определению содержания урана в растворённой и взвешенной формах. По данным Батурина, содержание урана в дельтовых илах 12 рек бывшего СССР изменяется в пределах  $(0,4\text{--}3) \cdot 10^{-6}$  г/г. Максимальные величины характерны для взвесей Сырдарьи, Дона и Волги, минимальные – для взвесей Северной Двины и Амударьи. Средневзвешенное значение, определённое с учётом годового твердого стока, составляет  $1,05 \cdot 10^{-6}$  г/г, что более чем в два раза ниже  $(2,6 \cdot 10^{-6}$  г/г) среднего содержания урана в земной коре. Для рек бассейнов Чёрного и Каспийского морей Батурин установил две общие закономерности: 1) прямую зависимость относительного содержания взвешенного урана от модуля твёрдого стока (среднегодового количества наносов, поступающих с единицы площади водосбора) и значительно менее чёткую, но также прямую зависимость от доли механической денудации; 2) обратную зависимость среднего содержания урана в воде от модуля водного стока (среднегодового количества воды, поступающей с единицы площади водосбора).

В океанической воде среднее содержание урана близко к  $3 \cdot 10^{-6}$  г/л [Виноградов, 1967]. И.Е. Старик и Л.Б. Колядин [1957] на основании экспериментальных данных показали, что в океанических водах уран находится в ионно-дисперсном состоянии в виде прочного уранил-карбонатного комплекса  $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ . Лишь при  $\text{pH} > 7,5$  и

$Eh < 0,1$ , не типичных для океанических вод, возможно существование урана в форме продуктов гидролиза, способных адсорбироваться на коллоидных и более крупных взвешенных частицах и осаждаться на дно. В водах морей, которые питаются реками из гумидных зон, содержание урана несколько ниже (для Балтийского моря  $0,8\text{--}2,2 \cdot 10^{-6}$  г/л [Батурин, 1968]), в водах замкнутых бассейнов аридных зон содержание урана повышается (для Аральского моря  $30\text{--}50 \cdot 10^{-6}$  г/л, для Каспийского моря  $10 \cdot 10^{-6}$  г/л [Коченов, Батурин, 1967]. В пределах бассейна по площади и глубине уран распределяется достаточно равномерно. Лишь в придонных слоях Чёрного моря содержание урана заметно падает до  $n \cdot 10^{-7}$  г/л [Батурин и др., 1966]. Это падение авторы связывают с процессами его адсорбционного извлечения из воды непосредственно у контакта с осадками при наличии резко восстановительной среды. Причем одним из важнейших факторов является органическое вещество, которое, по их мнению, может захватывать уран в процессе осаждения из водной толщи, заражённой сероводородом. Концентрация урана во взвесях Индийского океана изменяется от 0,1 до  $2 \cdot 10^{-6}$  г/г [Кузнецов и др., 1967]. Однако основное количество урана, т.е. более 99,9%, в океанической воде находится в растворённой форме.

В наиболее широких пределах содержание урана варьирует в подземных водах. Это объясняется разными формами вхождения урана в горные породы, различием гидродинамического режима и различной гидрохимической обстановкой, обуславливающей переход радиоактивных элементов в воду. Обычно большинство исследователей в пределах каждого артезианского бассейна выделяют три гидродинамические зоны: интенсивного, затруднённого и весьма затруднённого водообмена. В зоне интенсивного водообмена распространены воды с растворённым кислородом, обладающие высоким окислительно-восстановительным потенциалом. В этой зоне происходит окисление четырёхвалентного урана в шестивалентный и переход его в раствор. В зонах затруднённого и весьма затруднённого водообмена, характеризующихся восстановительными условиями, воды лишены кислорода, но обогащены сероводородом и органическим веществом. Вода этих зон содержит уран в очень малых количествах.

## Исследование задач динамики влаги и палеогидрологии

Прямые измерения скорости переноса влаги в атмосфере на основе исследований содержания трития в атмосферном водяном паре были проведены в Институте водных проблем АН СССР [Ферронский и др., 1980]. В основу этих измерений была положена идея обнаружения тритиевой метки в водяном паре, образовавшейся в результате взрыва ядерного устройства, произведенного КНР в 1978 г. Регулярный отбор проб водяного пара для анализа содержания трития был начат в ноябре 1977 г. в Москве. Пробы отбирались в приземном слое воздуха на высоте 5 м над землёй регулярно, один раз в месяц. После сообщения о ядерном взрыве в КНР, который был произведен 14 марта 1978 г., отбор проб участился. Пробы отбирались 16, 17, 21, 22 и 23 марта. 4, 13, 18 и 26 апреля, а также последующие месяцы вплоть до июля 1978 г.

В течение двух недель после взрыва прохождение радиоактивного облака было зафиксировано в Японии, Канаде, Англии, Норвегии по превышению уровня радиоактивности в атмосферном воздухе и в атмосферных осадках [Cambray et al, 1978]. Следует отметить, что большая часть таких радиоактивных изотопов, как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{140}\text{Ba}$  и др. (за исключением  $^{14}\text{C}$ , Т и некоторых изотопов инертных газов), образующихся при ядерных взрывах в атмосфере, сорбируются аэрозолями, в силу чего для определения содержания радиоактивных изотопов в атмосфере чаще всего изучают аэрозоли. Степень различия движения водяного пара и аэрозолей может отличаться от движения воздуха в нижних слоях тропосферы из-за удаления аэрозолей осадками и их оседания на подстилающую поверхность [Стыро, 1968]. Кроме того, из динамики флюидов известно, что скорости флюида-носителя и инородных частиц связаны соотношением  $V_q = V_h(1+h)$ , где  $V_q$  – скорость инородной частицы;  $V_h$  – скорость флюида-носителя;  $h=f(m_q)$  коэффициент распределения, зависящий от массы  $m_q$  движущихся частиц. Если воздушный поток переносит частицы, имеющие различные массы, то коэффициент  $h$  будет тем больше, чем больше масса частицы, а значит, тем меньше её скорость.

23 марта в Москве было зафиксировано первое повышение концентрации трития в атмосферном водяном паре до 400 ТЕ, что в

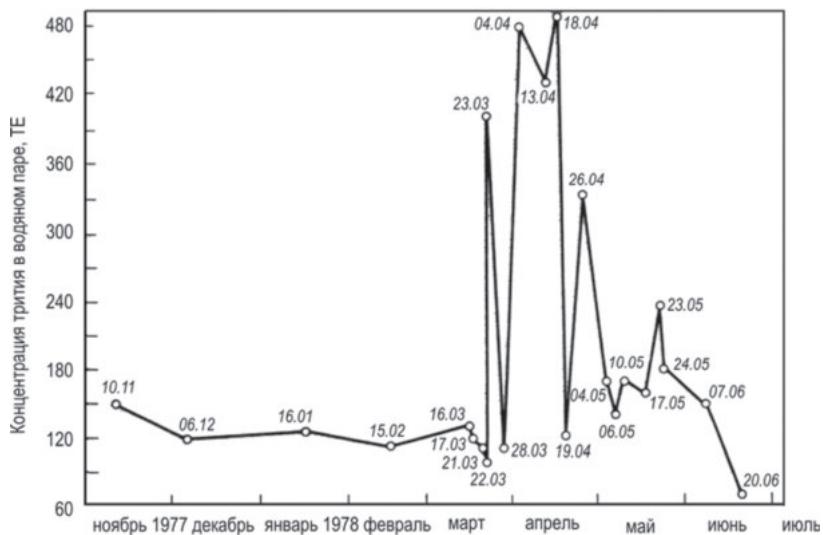


Рис. 7. Изменение концентрации трития в атмосферном водяном паре с ноября 1977 г. по июнь 1978 г. Цифрами у экспериментальных точек указаны даты отбора проб

четыре раза превысило его концентрации, отмеченные ранее с ноября 1977 г. (рис. 7). В пробе, отобранный 28 марта, концентрация трития равнялась нормальному для этого периода года уровню (120 ТЕ); 4 апреля она вновь имела пиковое значение (480 ТЕ). Близкая к этому значению концентрация трития наблюдалась в пробах, отобранных 13 и 18 апреля; 26 апреля содержание трития в водяном паре было вдвое меньше последней, а в дальнейшем снизилось до нормально-го фона.

Авторы произвели оценку концентрации трития в атмосферном водяном паре радиоактивного облака от ядерного взрыва 14 марта 1978 г., для чего приняли минимальное значение выхода трития при взрыве  $-0,07 \text{ кг/Мт}$  [Miske, 1973]. Тогда для взрыва небольшой мощности (до 10 кт) выход трития составит 0,7 г, или около 7000 Ки. Большая часть трития после взрыва образует молекулы НТО и в начальный момент сосредотачивается в ограниченном объёме атмосферы, который можно представить в виде цилиндра с площадью основания  $S=\pi D^2/4$ , где  $D$  – диаметр облака, м, который, согласно [Glasson, 1962], равен  $360 W^{5/4}$  ( $W$  – энергия взрыва, кт). Для  $W=10$  кт и  $D\approx 1000$  м  $S=1$  км.

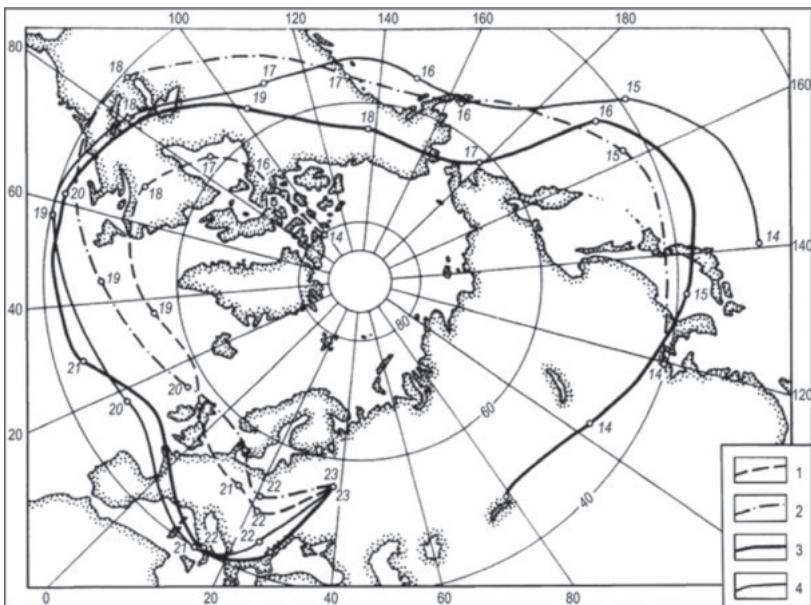


Рис. 8. Расчётные траектории и даты движения воздушных масс на высотах 1–3 (700); 2–5 (500); 3–9 (300); 4–12 (200) км; (в скобках указано атмосферное давление, мб). Траектории 2 и 3 привязаны к 12 ч, 1 и 4 – к 00 ч по Гринвичу

Повышенная концентрация трития, зарегистрированная в Москве 23 марта 1978 г., связана с прохождением над городом воздушной массы, которая находилась над КНР и прошла над Японией, Тихим океаном, Канадой, США, Атлантическим океаном, Средиземным морем и юго-востоком Европы (рис. 8). Перемещение воздушной массы с повышенной концентрацией трития в водяном паре про слежено на высоте изобарической поверхности 300 мб (9 км). На более низких высотах (5 и 3 км) перемещение воздушных масс происходило медленнее за счёт большей неоднородности барического поля и меньшей скорости их движения чем на высоте 9 км. Так, если на высоте 9 км за 12 и 23 марта рассматриваемая воздушная масса прошла путь от Бухареста до Москвы, то на высоте 5 км воздушные частицы прошли путь в два раза меньший.

Анализ барического поля показал, что 23 марта на высотах 5 и 3 км Москвы достигли воздушные частицы, пришедшие из районов Северного полушария, совсем другие, чем воздушные частицы, перемещавшиеся на высоте 9 км. По расчётам авторов данной рабо-

ты, воздушные частицы, пришедшие в Москву 23 марта на высоте 12 км (АГ – 200 мб), ещё 14–15 марта находились над Тихим океаном, к востоку от Японии, т.е. восточнее района взрыва.

Карты барической топографии показали, что с 14 марта и до конца апреля в умеренных широтах Тихого океана наблюдалась очень устойчивая зональная циркуляция воздушных масс, препятствовавшая широтному рассеянию радиоактивного облака, которое перемещалось в мощном западном потоке воздушной массы, пришедшей в Москву 23 марта.

Таким образом, повышение концентрации трития в атмосферном водяном паре, зарегистрированное в Москве 23 марта, вызвано приходом воздушной массы, которая в день ядерного взрыва находилась над северо-западной территорией КНР. Оттуда эта масса перемещалась в восточном направлении в слое между 5 и 9 км по соответствующим траекториям. Проба атмосферного водяного пара, взятая 28 марта 1978 г., характеризовалась нормальной концентрацией трития (120 ТЕ). Воздушная масса, из которой отбиралась проба в этот день, в момент взрыва находилась в районе Индокитайского полуострова и перемещалась по более южной траектории, чем воздушная масса, вышедшая с территории КНР 14 марта 1978 г. Условия общей циркуляции атмосферы (циклон над Якутией и антициклон в южных широтах) не способствовали её перемешиванию с более северными воздушными массами. Примерно половина её пути проходила над Тихим океаном в широтном поясе 20° и 30° с.ш., а затем над территорией США. Путь этой массы над Атлантическим океаном и Европой мало отличался от пути движения воздушной массы, пришедшей в Москву 23 марта, но происходил с отставанием. Пиковые концентрации трития 13, 18 и 26 апреля (см. рис. 8), вероятно, также связаны с взрывом 14 апреля 1978 г., поскольку значительные превышения концентраций короткоживущих изотопов (таких, как  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ) в атмосфере, вызванные этим же взрывом, отмечались на станциях наблюдательной сети AERE до конца апреля [Cambray et al., 1979].

Наблюдения за тритиевой меткой, образовавшейся в результате произведенного в КНР ядерного взрыва, и построение траекторий перемещения воздушных частиц позволили очертить путь, пройденный воздушной массой с повышенной радиоактивностью, и затраченное на него время. Эта масса пришла из КНР в Москву

через 9 дней после взрыва, пройдя за это время около 30 000 км. Скорость перемещения воздушных частиц на высоте 9 км составила примерно 3000 км/сут. Для обращения вокруг земного шара в широтном поясе от 40° до 65° с.ш. (в отдельных местах траектория воздушных частиц опускалась до 35° с.ш.) воздушной массе понадобилось 12 дней, при этом пройденный ею путь составил 33 000 км. Время обращения водяного пара вокруг Земли, равное 12 дням, относится к высоте, на которой обычно переносится очень мало влаги.

Для изучения процессов разбавления атмосферной влаги поверхностной морской водой В.В. Романовым и Х.Г. Кикичевым [1981] были выполнены экспедиционные работы в августе 1978 г. в время рейса НИС «Муксун» Морского гидрографического института АН УССР. Проводился одновременный отбор проб поверхностной морской воды и атмосферного водяного пара в северо-западной части Чёрного моря. Отбор водяного пара производился методом адсорбции на синтетических цеолитах; измерение концентрации трития – жидкостно-сцинтилляционным методом с предварительным электролитическим обогащением. Интересно отметить, что полученные результаты о доле морской воды в атмосферном водяном паре совпадают с результатами работы, проведенной на оз. Иссык-Куль, где доля озёрной воды в атмосферных осадках достигала 50% {Брезгунов и др., 1980}.

Одним из важных процессов водообмена в прибрежных морских акваториях является смешение морских и речных вод. Экспериментальное изучение этого процесса с использованием трития и других природных изотопов является перспективным направлением океанографических исследований. Были выполнены экспериментальные исследования в бассейнах Чёрного и Белого морей по изучению условий смешения морских и речных вод с помощью трития [Романов, 1982]. Аналогичные исследования по оценке условий смешения речных и морских вод с помощью трития и кислорода-18 были выполнены для Каспийского моря [Романов 1982; Брезгунов и др., 1982]. Совместное использование трития и стабильных изотопов позволяет выполнить более детальный анализ условий смешения речных и морских вод на экспериментальной основе.

Космогенные изотопы нашли применение при решении задач, связанных с определением времени водообмена в природных резервуарах, а также при изучении взаимосвязи между атмосферными осадками и речным стоком, при расчленении гидрографа на компоненты, при оценке параметров подземного стока в реки и водохранилища. Как правило, такие исследования сочетаются с использованием стабильных изотопов водорода и кислорода и классических методов

Работы по исследованию крупнейшего в мире пресноводного озера Байкал проводились на протяжении ряда лет [Сойфер и др., 1970; Брезгунов и др., 1980], когда впервые с этой целью были отобраны и проанализированы образцы воды на двух глубоководных станциях, расположенных в районе максимальных глубин. В 1973 г. были проведены съемки поля концентраций трития в поверхностных водах озера вдоль его западного берега и получено распределение концентрации трития по глубине в северной котловине озера (от Нижнеангарска до створа мыс Котельниковский–Иринда).

Гидрологические и гидрогеологические задачи, решаемые с использованием  $^{14}\text{C}$ , можно разделить на две группы: задачи качественные и количественные. К первой группе следует отнести задачи, связанные с определением локальных очагов питания водоносных горизонтов, областей разгрузки подземных вод и мест взаимосвязи водоносных горизонтов. Вторая группа задач включает оценку возраста подземных вод, определение пропорций смешения вод различных водоносных горизонтов и комплексов, расчленение водопритоков в горных выработках, определение региональных направлений и скоростей фильтрации подземных потоков. Примером изучения взаимосвязи подземных вод с использованием радиоуглерода является работа по изучению Днепровско-Донецкого артезианского бассейна [Боревский и др., 1975].

Интересные палеогидрологические исследования были выполнены в Арало-Каспийском бассейне. Считается, что гидрологические, климатические и экологические изменения в Арало-Каспийском бассейне являются интегральным отражением природно-климатических изменений, происходящих на территории Европы и Центральной Азии под действием потока атмосферной влаги, переносимой циклоническими вихрями, которые формируются в

Атлантическом океане и перемещаются с запада на восток силовым полем Земли. Давно замечено, что интегральная реакция на эти природно-климатические изменения проявляется в виде колебаний уровня Каспийского моря, которые происходят в форме квазипериодических изменений с амплитудой до десятков метров и с периодом от десятков до сотен и тысяч лет. Последнее такое повышение уровня моря после его 40-летнего падения произошло с 1977 по 1995 гг. с амплитудой подъёма около 2,5 м.

В августе 1994 г. в ходе российско-французской экспедиции были отобраны керны донных осадков в глубоководных частях Среднего и Южного Каспия. Оборудование для отбора керна состояло из поршневой трубки Кулленберга с внешним диаметром 114 мм. Внутри стальной трубы помещали пластиковую трубу-оболочку с внутренним диаметром 90 мм, снабжённую поршневой системой. На верхнем крае 25-метровой колонны труб монтировали балластный груз весом 1,5 т. Колонну опускали на лебедке за борт корабля и с высоты 100 м от дна моря колонна свободно падала в точке отбора керна. Затем колонну с керном поднимали на борт. Пластиковую оболочку с керном извлекали из стальной трубы, разрезали на секции по 1,5 м длиной, изолировали и маркировали. В таком виде керн отправляли для лабораторного анализа вещественного и изотопного состава осадков. Всего отобрали 28 кернов, которые были разделены между партнёрами для дублирования лабораторных анализов. Максимальная длина керна, отобранного в Среднем и Южном Каспии составляла около 10 м при глубине воды 500 м. Наряду с отбором керна донных осадков, на станциях проводили замеры солёности и температуры воды, а также отбирали пробы воды для определения её химического и изотопного состава. Всего было сделано 15 станций, в том числе 7 в Южном, 6 в Среднем, и 2 в Северном Каспии.

В 1995 и 1996 гг. на Каспийском море были проведены два круиза МАГАТЭ, во время которых на станциях меридионального профиля произведен отбор проб воды, замерялась температура и солёность по разрезу водной толщи. Пробы воды отбирали также и во время российско-французской экспедиции 1994 г. Воду анализировали на содержание дейтерий, кислорода-18 и трития. Дополнительно были отобраны специальные пробы воды для анализа в них содер-

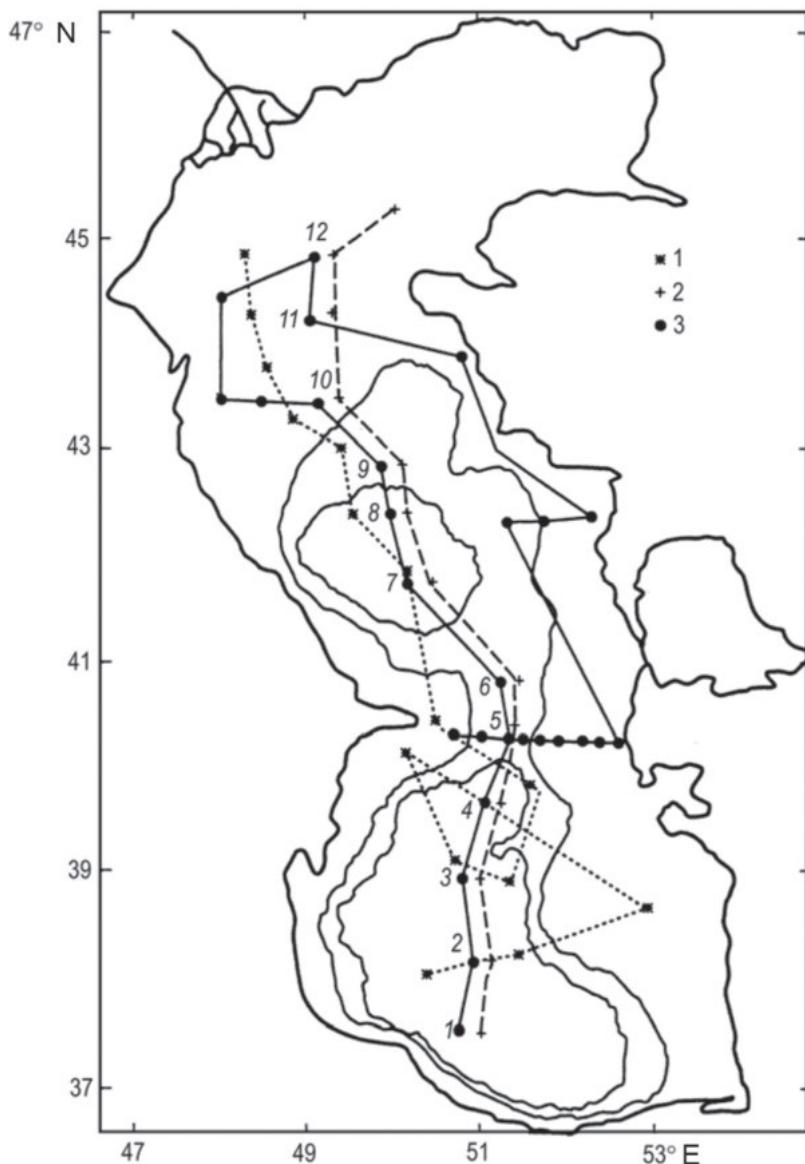


Рис. 9. Маршруты экспедиций и станции отбора керна и образцов воды в 1994 (1), 1995 (2), 1996 (3) гг.

жания изотопов гелия, трития и урана-тория. Кроме того, была выполнена работа по изучению содержания изотопов водорода и

кислорода в среднемесячных пробах атмосферных осадков и в ежемесячных одноразовых пробах волжской воды.

Сделанные измерения позволили получить представительную картину текущего распределения изотопных и океанографических параметров водных масс Среднего и Южного Каспия на стадии стабилизации уровня моря после почти 20-летнего периода его подъёма (1977–95 гг.). Полученные фактические данные проанализированы с позиций водообменных процессов, происходящих в бассейне. Маршруты НИС и станции отбора проб показаны на рис. 9.

В ноябре 1999 г. была организована ещё одна экспедиция по программе Европейского проекта «Коперникус» для бурения и отбора керна донных осадков из залива Кара-Богаз-Гол. Работы проводились на северо-западном участке залива у пос. Бекдаш. Удалось отобрать керн диаметром 90 мм с ненарушенной структурой размером около 5,5 м. Этот керн в виде секций по 1 м в пластмассовой оболочке был доставлен в хранилище и затем использован для лабораторных анализов. Описание разрезов и анализ опытных данных были выполнены на основе определения изотопного и вещественного состава осадков, анализа содержания глинистых минералов, определения ионного состава солей водных вытяжек, анализа записи магнитной восприимчивости минералов, спорово-пыльцевого, диатомового анализа, радиоуглеродного датирования и других проведённых измерений [Ферронский и др., 1999; Куприн и др., 2003].

Было найдено, что исследуемые колонки донных осадков Южного и Среднего Каспия покрывают временной интервал до 24 тыс. лет. По минеральному и споро-пыльцевому составу нижние слои двух кернов относятся к нижнехвалынскому времени  $hv_1$ . Анализ комплекса полученных данных об изотопном составе карбонатных минералов, химическом составе водных вытяжек, а также результатов радиоуглеродного датирования и батиметрических исследований Апшеронского порога позволяют сделать ряд выводов об имевших место событиях, связанных с палеоклиматическими изменениями.

По данным радиоуглеродного возраста проб осадков, отобранных с различной глубины колонок керна из Южного и Среднего Каспия (рис. 10) построены кривые скорости осадконакопления. Здесь приращения слоя  $\Delta h$  по глубине колонки к соответствующему приращению времени накопления осадка  $\Delta t$  есть скорость осад-

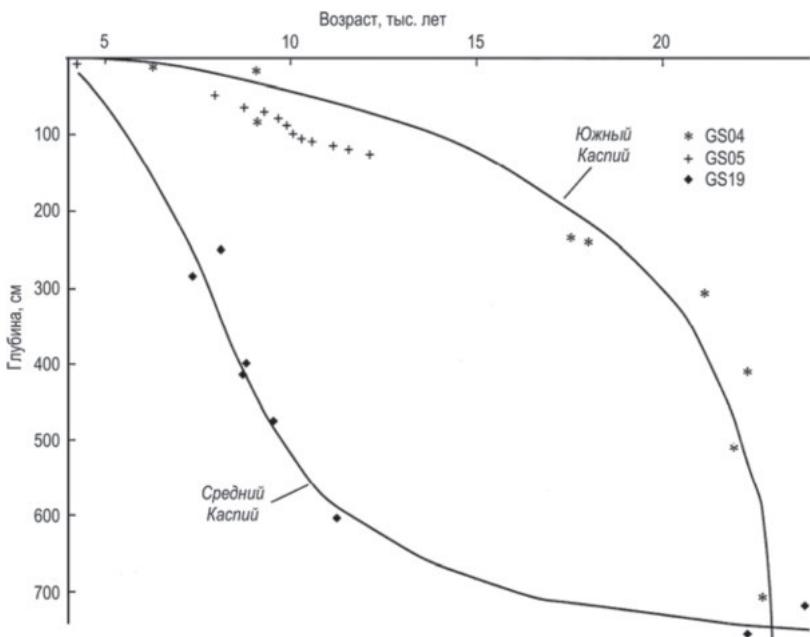


Рис. 10. Изменение скорости осадконакопления во времени по данным анализа кернов конакопления. Как видно из рисунка, скорость осадконакопления в двух бассейнах носила диаметрально противоположный характер: увеличение скорости седиментации в одном бассейне сопровождалось её снижением в другом. В интервале времени от 24 до 11 тыс. лет средняя скорость накопления осадков в Среднем Каспии была низкой и составляла 0,12 мм/год, в то время как за период с 11 до 6 тыс. лет она возрастила на порядок и составляла 1,2 мм/год. В Южном Каспии, наоборот, с 23 до 17,6 тыс. лет средняя скорость седиментации достигала 0,9 мм/год, а с 17,6 до 6 тыс. лет она снизилась в среднем до 0,19 мм/год. Объяснение этому факту можно найти, если предположить, что нарастание объёма стока рек в Средний Каспий началось лишь 11–12 тыс. лет назад. До этого времени питание бессточного моря шло за счёт стока рек с южного склона водосборного бассейна.

Предположение о смене интенсивности режима стока рек северной и южной частей водосборного бассейна подтверждается и сравнительными данными о солёности моря по водным вытяжкам. Пониманье найдено, что в интервале 5,4–1,5 м керна GS04 вода Южного Кас-

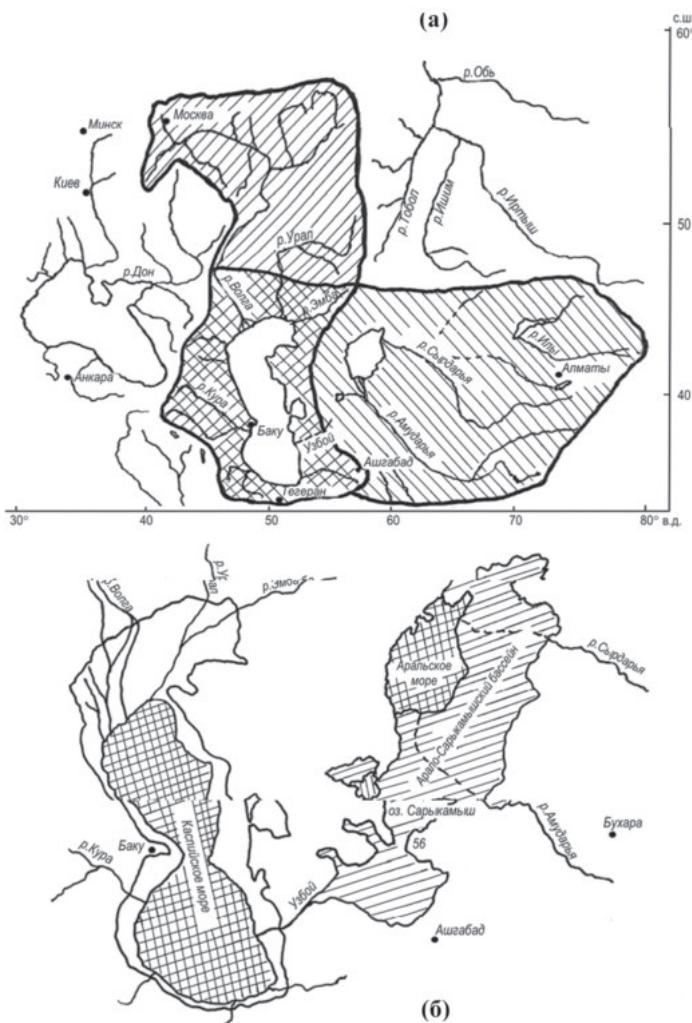


Рис. 11. Эффект широтного смещения зоны гумидного климата Арало-Каспийского региона: а – смена водосборного бассейна с Волго-Уральского на Амударьинско-Сарыкамышский, б – регressiveия Каспийского и трангрессия Аральского морей в переходный период смещения климатической зоны

ния была опреснённой по сравнению с водой Среднего Каспия. Этот интервал осадков формировался с 22,5 до 17 тыс. лет. Пополнение Южного Каспия пресной водой могло быть только за счёт речного стока с южного склона. Для Среднего Каспия по керну GS19

интервал глубин 7,5–2 м характеризуется повышенной солёностью, что свидетельствует о превышении испарения над речным стоком для этого бассейна. Данному интервалу глубин соответствует временной интервал 22,5–12 тыс. лет. Сток в Средний Каспий в этот период можно ожидать главным образом с востока и юга через Апшеронский порог и в меньшей степени с севера.

Наиболее высокая пиковая солёность в среднем бассейне отмечается дважды. Здесь она фиксируется в колонке осадков на глубинах 5,8–5,5 м (соответствует 12–15% привозрасте осадков) 12–12,5 тыс. лет. В колонке южного бассейна солёность начинает расти с глубины 5,4 м и достигает пика на глубине 1,4 м, где возраст осадков также 12 тыс. лет. Однако солёность здесь достигает лишь 10%. Этот факт свидетельствует в пользу продолжавшегося в рассматриваемый период питания южного бассейна речным стоком с южного склона.

Второй пик высокой солёности в Среднем Каспии отмечался 5–6 тыс. лет назад на глубине колонки 0,5 м для южного бассейна и 6–6,5 тыс. лет на глубине 1,5 м. Наблюдается соответствующая корреляция отмеченных параметров солёности и глубины осадков с изотопными данными.

Кривые изменения изотопного состава кислорода и углерода карбонатных минералов также подтверждают идею очевидного питания южного бассейна в отмеченный интервал времени за счёт речного стока с южного склона. Этот период осадконакопления в целом характеризуется наиболее отрицательными значениями  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ . При этом интересно отметить, что по изотопному составу вода южных рек того времени мало отличалась от воды современной Волги. Этот факт свидетельствует о широтном смещении климатического пояса современной европейской гумидной зоны в Среднеазиатский и Ирано-Кавказский регионы водосборного бассейна Каспийского моря (рис. 11).

Наконец, ещё один факт в пользу периодического питания Каспия за счёт стока рек с южного склона – документально подтверждаемое существование руслового вреза в Апшеронском пороге с очевидным преимущественным направлением водного потока в нём с юга на север.

На основе полученных экспериментальных данных можно обнаружить ряд реперных отметок, около которых находился уровень

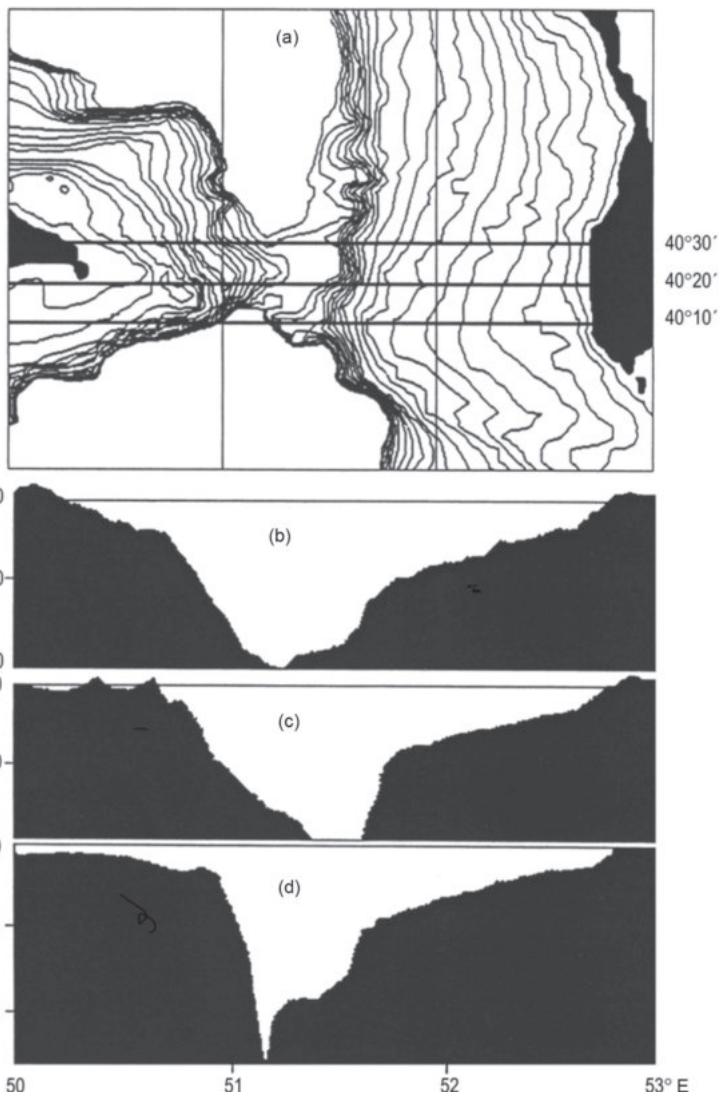


Рис. 12. Батиметрическая карта Апшеронского порога с изобатами через 10 м (a) и разрезы порога по широтам  $40^{\circ}10'$  (b),  $40^{\circ}20'$  (c),  $40^{\circ}30'$  (d)

моря в периоды его квазистационарного пребывания. По данным минерализации поровых вод на основе анализа водных вытяжек с учётом уплотнения осадков, самая низкая солёность каспийской воды составляла 5–7‰. Это событие зафиксировано на глубинах 5,4 и

7,6 м для кернов из южного и среднего бассейнов соответственно. Здесь возраст осадков для обоих кернов оказался равным 22,5 тыс. лет. Такая солёность в 2–2,5 раза ниже современной. В этом случае с учётом современного объёма Каспийского моря (80 тыс. км<sup>3</sup>) и средней солёности 13‰ объём воды в бассейне должен составлять ~200 000 км<sup>3</sup>. Элементарный подсчёт показывает, что в этот период уровень воды в море должен находиться на отметке выше современной примерно на 70 м. Вероятно, в этот период Каспийское море имело гидравлическую связь с Черноморским бассейном через Кума-Манычский водораздел.

Важную информацию для обсуждения рассматриваемых вопросов даёт анализ топографии дна Апшеронского порога [Ферронский и др., 1999; Куприн, 2002]. Его батиметрическая карта и широтные разрезы по трём сечениям приведены на рис. 12. Видно, что порог имеет русловой врез, по которому поток имел направление движения с юга на север. Об этом свидетельствует узкий, шириной всего в несколько сотен метров по дну, вход потока с юга и широкий, до 30 км, устьевой выход в Средний Каспий. В верхней, наиболее древней части русла глубиной до 80 м западный берег крутой, подмытый за счёт эффекта вращений Земли, а восточный – пологий. Ниже 80 м более крутым оказался восточный берег, очевидно, в связи с размывом более слабых пород порога и поворотом потока в северо-восточном направлении. Как видно на плане в нижней части вреза палеорусло делает петлю и снова выходит к западному берегу Среднего Каспия выше широты 40,5°. Движение потока воды с севера на юг также имело место. Об этом свидетельствует узкий врез с южной части порога до глубины ~200 м, который виден на рис. 12г.

Другая важная часть информации, которую содержит русловой врез Апшеронского порога, – выделяющиеся на разрезе речные террасы. Они служат свидетельством положения уровня моря в периоды относительно длительного квазиравновесия уровня Каспия. Выделяется наиболее древняя главная восточная терраса, расположенная на глубине 80 м от современного уровня моря. На ней на разных отметках можно выделить несколько более мелких по простирации террас, свидетельствующих об изменениях уровня моря в ранние эпохи. Ниже 80 м на западном склоне заметны, по крайней мере, три террасы, сформировавшиеся в более позднее время.

Наиболее важные результаты выполненных исследований донных осадков и водных масс в Каспийском и Аральском морях, заливе Кара-Богаз-Гол и озере Иссык-Куль, связанные с выявлением природы гидроклиматических изменений, следующие.

1. Скорость седиментации осадков в среднем и южном бассейнах Каспийского моря носит ярко выраженный инверсионный характер, что свидетельствует о смене направления речного стока с севера на юг.

2. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатной фракции осадков Каспия показывает, что в период активного осадконакопления лёгкая по изотопному составу речная вода поступала попеременно со среднеазиатского и с европейского водосборных бассейнов.

3. Судя по химическому составу поровых вод и осадков, одинаковая солёность в двух Каспийских бассейнах отмечена лишь около 22 тыс. лет назад при интенсивном стоке воды со среднеазиатского водосборного бассейна. В этот период уровень воды в море по сравнению с современным был на 70 м выше, и Каспийское море имело гидравлическую связь с бассейном Чёрного моря.

4. Анализ перемещения и аккумуляции обломочных частиц размером от 1 до 0,63 мм позволяет выделить 8 регressive-трангрессивных циклов, имевших место в Каспийском море за последние 20 тыс. лет.

5. Изучение современной динамики моря по изотопному составу водорода и кислорода на основе проведённых в 1995–96 гг. экспедиций МАГАТЭ показывает, что зафиксированный в период 1978–95 гг. подъём уровня Каспийского моря до 2,5 м не затрагивал структурных изменений водной толщи ниже 300 м. В 1996 г. на основе анализа результатов тритиевых измерений было зафиксировано изменение структуры водной толщи на самой южной станции отбора проб. Тритиевый индикатор оказался наиболее чувствительным по отношению к данному эффекту [Брезгунов, Ферронский, 2005].

6. Изучение донных осадков из залива Кара-Богаз-Гол показывает, что в период 9,2 до 8,5 тыс. лет назад водоём пересыхал, и накопление в нём осадков шло за счёт твёрдого стока реки Карын-Жарык и её притоков. Концентрация  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , равная около 2,5–3 г/л, указывает на отсутствие связи озера со Средним Каспием. Около 8,5 тыс.

лет значение  $\delta^2\text{H}$  в воде упало до  $-6\text{\textperthousand}$ , что свидетельствует о начале наполнения солёного водоёма речной водой. В период с 8,5 до 2,2 тыс. лет значение  $\delta^2\text{H}$  в поровой воде снизилось до  $-17\text{\textperthousand}$ , что указывает на увеличение объёмов речного стока. Озеро быстро наполнялось водой, и около 3 тыс. лет назад начался периодический сброс воды в Средний Каспий. После Ново-Каспийской трансгрессии около 2,2 тыс. лет р. Карын-Жарык с притоками высохла, и с тех пор залив пополняется водой из Каспийского моря.

7. По данным изучения береговых террас и донных осадков в истории Аральского моря в голоцене было отмечено четыре трансгрессии и три регрессии. Уровень воды в море поднимался до абсолютных отметок 57, 54,7, 53,5 и 53 м, а падал до 44, 43, и 35 м соответственно. Уровень моря на отметке 57 м указывает на событие, когда вода из бассейна Аральского моря сбрасывалась в бассейн Южного Каспия через р. Узбой. В керне донных осадков были найдены два слоя торфа толщиной 0,2 и 0,4 м с возрастом 4,5 и 1,3 тыс. лет соответственно. Со временем 1,3 тыс. лет и до наших дней процесс накопления осадков продолжается при переменном гидрологическом режиме и при периодическом подъёме и падении уровня моря. Эти данные подтверждаются наблюдаемым переслаиванием песчаных и глинистых осадков и периодическим появлением кристаллов солей в разрезе донных отложений.

8. Результаты изотопных, минералогических и химических исследований донных осадков озера Иссык-Куль показывают, что в период с 7,6 до 6 тыс. лет процесс седиментации протекал в условиях постоянного сброса холодной воды в р. Чу. Низкая концентрация органического углерода, моногидрокальцита,  $\delta^{18}\text{O}$  и низкие значения  $\text{Sr/Ca}$ , а также небольшое увеличение концентрации  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  на верхней границе соответствующего интервала керна подтверждает этот вывод. В период с 6 до 4,3 тыс. лет процесс седиментации продолжался, но объёмы поступавшего речного стока уменьшились, увеличилась солёность, а уровень воды в озере и скорость осадконакопления снизились. Этот вывод базируется на фактах возросшего значения  $\delta^{18}\text{O}$  в раковинах моллюсков, снижения содержания  $\text{Mg}^{2+}$  выпадавших кальцитов, увеличения концентрации органического материала и отношения  $\text{Sr/Ca}$  в раковинах. По данным исследований самого верхнего интервала керна установлено, что в

период с 4,3 тыс. лет до современного происходило периодическое падение и подъем уровня озера до ложа р. Чу, через которую сбрасывался избыток озёрной воды.

9. По результатам измерений содержания  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  и датирования по  $^{14}\text{C}$  Ясханской линзы пресных подземных вод в Западной Туркмении показано, что её минерализация менее 0,6 г/л и содержание радиоуглерода до 17–22% относительно современного сформировались около 12 тыс. лет назад, что подтверждает её генетическую связь с Арало-Сарыкамышским палеобассейном.

10. На основе изотопных исследований, которые проводились в бассейнах рек Аму Дарьи, Сыр Дарьи, Чу и Или, а также в Сирийской пустыни, было отмечено влияние плювиального периода на формирование подземных вод регионов Средней Азии и Ближнего Востока.

Диаметрально разные скорости осадконакопления, соленость поровых вод, изменение других седиментационных и водных характеристик Среднего и Южного Каспия, а также характер батиметрических разрезов субмаринной части Апшеронского порога свидетельствуют о том, что до недавнего времени Каспийское море было разделено сухопутным Апшеронским перешейком шириной около 50 км и представляло два изолированных озера, вода из которых при переполнении одного из них перетекала и размывала естественную перемычку. Геологическая история Апшеронского порога подтверждает этот вывод. Батиметрическое строение порога свидетельствует о том, что основное направление эродирующего потока воды было с юга на север. Полный размыв перемычки и слияние озер в единое море, очевидно, произошли между 12 и 8 тыс. лет назад.

Аральское море сбрасывало воду в Каспий до тех пор, пока Туранская низменность была заполнена до абсолютной отметки +56 м. С 23 до 8 тыс. лет низменность была заполнена водой до этой отметки и образовывала мелководное Арало-Сарыкамышское море. И всё это время через р. Узбой у порога горы Кугунёк избыток воды поступал в Каспийское море. Теперь эродированные берега Узбоя и следы его бурной деятельности можно видеть у подножия Копет Дага.

Выявленные в Арало-Каспийском водосборном бассейне гидроклиматические изменения, а также аналогичные факты, наблюдаемые

в других регионах земного шара, привели авторов к мысли попытаться найти физические первопричины короткопериодных процессов, вызывающих эти эффекты. Следуя известному и подтверждённому наблюдениями астрономическому подходу Миланковича, в котором он связал изменения климата с широтно-долготными изменениями в распределении потока солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, было решено распространить этот подход на короткие периоды. Для этой цели потребовалось рассмотреть задачу о вращении и колебании Земли в собственном силовом поле.

### **Происхождение гидросфера как эффект разделения Земли на оболочки**

В основе наиболее распространённых представлений об образовании Земли и других тел Солнечной системы лежит гипотеза аккреции вещества протопланетного газопылевого облака. Единого взгляда на происхождение самого газопылевого облака не существует. Одни исследователи полагают, что протопланетное облако было захвачено из межзвёздной туманности уже существовавшим Солнцем на пути своего движения в галактическом пространстве [Шмидт, 1957], другие считают, что оно является продуктом эволюции более массивного облака, из которого сформировалось само Солнце [Cameron, Pine, 1973; Cameron, 1973].

Космохимические факты, полученные в последние годы при исследовании метеоритов, Луны и планет, приводят многих исследователей к другим представлениям о процессе формирования тел Солнечной системы. Нами был выполнен анализ большого фактического материала об изотопном составе водорода и кислорода воды гидросферы на предмет выяснения условий выделения этой наиболее лёгкой оболочки планеты на стадии формирования Земли [Ферронский, 1974]. Были проанализированы многие из этих работ с целью установления пределов изменения содержания тяжёлых изотопов дейтерия ( $^2\text{H}$ ) и кислорода-18 ( $^{18}\text{O}$ ) в различных объектах. Результаты анализа представлены в табл. 8, где значения изотопного состава даны относительно стандарта SMOW.

При анализе изотопного состава воды в различных объектах в целом выделены следующие факты.

1. Содержание дейтерия во всех природных объектах имеет однозначную тенденцию в сторону уменьшения по сравнению с его

содержанием в океанической воде, достигая в газообразной фазе молекулярного водорода значений, характерных для атмосферы Солнца. Исключение составляют лишь углистые хондриты и лунные породы, в которых молекулярный водород в ряде случаев обогащён дейтерием.

2. Изотопный состав воды в современных океанах не свидетельствует в пользу идеи об их образовании за счёт выхода ювенильной воды из глубоких недр Земли.

3. Подземные воды обеднены  $^{18}\text{O}$  относительно пород и минералов.

4. Гидросфера Земли в целом обогащена дейтерием и обеднена кислородом-18 относительно горных пород и минералов.

5. Метеориты и образцы лунных пород отличаются по изотопному составу от земных объектов.

В то же время пределы изменения содержания  $^{18}\text{O}$  в образцах лунных пород близки к его значениям для земных пород аналогичного химического состава, что может свидетельствовать об общности материала, из которого происходило образование Земли, Луны и метеоритов.

Наблюдаемые закономерности распределения изотопов водорода и кислорода в природных водах, в породах и других объектах не согласуются с гипотезой акреции холодного гомогенного вещества Земли и не подтверждают ювенильной природы её гидросферы. Исходя из тех же фактов и учитывая весьма слабые признаки наличия воды в лунных породах, приходим к выводу о том, что ювенильная вода на нашей планете отсутствует и отсутствовала ранее, а сама гидросфера является атмофильным формированием.

Результаты всесторонних космохимических исследований метеоритов, планет и Луны позволяют сделать одно общее и, пожалуй, бесспорное заключение о том, что в протосолнечном, а затем и в пропланетном облаке имел место процесс химической дифференциации исходного вещества. Этот процесс привёл к космохимическому разделению вещества между планетами, а затем и между оболочками в планетах и спутниках. Механизм этого разделения, судя по всему, был единый. В этой связи потребовалось рассмотреть процесс разделения исходного вещества с позиций гравитационного взаимодействия масс исходной туманности и её динамики, основываясь на

Таблица 8  
Содержаниедейтерия и кислорода-18 в природных объектах

Объект	$\delta^2\text{H}$ , ‰					$\delta^{18}\text{O}$ , ‰			
	-1000	-600	-200	0	+200	-60	-20	0	+20
Галактика				+2860	+5360				
Солнечная атмосфера									
Земная атмосфера									
водород молекулярный									
углекислый газ									
кислород молекулярный									
атмосферные осадки									
метан									
Поверхностные воды									
кислород растворенный в воде									
вода рек и озер									
вода океанов									
Подземные воды и породы									
осадочные карбонаты и силикаты									
изверженные и метаморфические									
породы									
базальты и граниты									
рассолы									
гидротермальные воды									
пар и газ гидротерм и вулканов									
Природные органические вещества									
Метеориты									
тектиты									
хондриты									
железные метеориты									
вода углистых хондритов									
органическое вещество углистых									
хондритов									
Лунные породы									
вода в породах									
молекулярный водород									
углекислый газ									
образцы пород									

результатах спутниковых исследований гравитационного поля Земли и Луны и вытекающих из них физических следствий.

Мы обратились к результатам исследования Земли с помощью искусственных спутников (ИСЗ). За последние полвека с помощью ИСЗ и космических аппаратов получен большой объём новой информации о физике околоземного пространства и строении самой планеты.

С появлением ИСЗ и запуском специальных геодезических спутников ситуация с проведением наблюдений за движением планеты

коренным образом изменилась. По измеренным координатам орбит спутников были вычислены гармоники зональных, секториальных и тессеральных (по сферическим трапециям) гравитационных моментов в разложении гравитационного потенциала по сферическим функциям вплоть до десятых, двадцатых и выше порядков. На основе этих вычислений сделано важное научное открытие. Оно подтвердило давние предположения геофизиков о том, что Земля не находится в состоянии гидростатического равновесия, на котором основываются современные теории динамики, фигуры и внутреннего строения планеты. Аналогичное заключение было сделано и для Луны [Jeffreys, 1970; Мельхиор, 1976; Грушинский, 1976].

Для согласования модельных представлений динамики Земли и приведённых выше фактов по структуре гравитационного поля нами условие гидростатического равновесия планеты было заменено на условие динамического равновесия. Была сформулирована новая постановка задачи о динамике самогравитирующего тела в собственном силовом поле, её решению посвящены наши работы [Ферронский, Ферронский, 2007; 2012; Ферронский, 2016].

Одним из важных результатов наших исследований явилось открытие ещё одного нового закона орбитального движения планет, спутников и других тел Солнечной системы [Ферронский, Ферронский, 2012]. Суть закона состоит в том, что наблюдаемая величина средней орбитальной скорости каждой из планет и их спутников Солнечной системы равна первой космической скорости протосолнечного (протопланетного) облака, радиус которого определялся большой полуосью орбиты современной планеты (спутника). Закон справедлив для всех малых планет пояса астероидов и для всех комет. Орбитальное движение небесного тела происходит под действием энергии взаимодействия элементарных частиц внешнего потенциального поля родительского тела, при котором направление движения определяется правилом Ленца. Этот вывод подтверждается результатами астрономических наблюдений и вытекает из решения вириального уравнения Лагранжа–Якоби. Из найденного закона следует, что бытующее до сих пор представление о гравитационном притяжении взаимодействующих небесных тел оказалось умозрительным заключением. В действительности потенциальное поле небесного тела является центробежным эффектом взаимо-

действия составляющих его элементарных частиц, а материя вместе с её энергией является природным дискретно-волновым феноменом. На этой основе мы сделали вывод о том, что гравитация и инерция – это единый центробежный и равный ему центростремительный эффект взаимодействия элементарных частиц, составляющих данный материальный объект, при котором происходит перераспределение энергии взаимодействующих частиц и изменение формы их движения. Именно поэтому инертная масса равна гравитационной массе. Все остальные динамические процессы являются производными от этого эффекта. Самогравитирующее природное тело является блестящим образцом природной центрифуги [Ферронский, 2016].

Химическая дифференциация вещества при образовании планет и спутников Солнечной системы из единого облака под действием температурного перехода элементов и соединений от газообразного к жидкому и твёрдому состоянию или непосредственно из газообразной в твердую фазу на языке рассматриваемой динамики есть задача о разделении вещества по атомным и молекулярным массам в собственном силовом поле облака. Основой для рассмотрения такой задачи является эволюционный процесс, который связан с потерей облаком электромагнитной энергии в виде излучения, что вытекает из рассмотрения структуры потенциальной энергии негомогенной по составу элементов материальной системы.

Реальным механизмом разделения атомов и молекул по массам является пульсирующее внутреннее силовое поле, которое является механизмом генерирования потенциальной энергии [Ферронский, Ферронский, 2007, Ферронский, 2016].

Таким образом приходим к выводу, полученному на основе анализа изотопных данных о выделении гидросферы Земли как оболочки при формировании планеты при соответствующих космохимических условиях образования молекул воды в форме  $\text{H}_2\text{O}$ .

### **Заключение**

Гидросфера является наиболее динамичной из всех оболочек Земли. С динамикой и эволюцией гидросферы обычно связывают формирование осадочного чехла земной коры. Анализ изотопных и гидрохимических данных позволяет наиболее полно понять природные условия формировании водных ресурсов, а также роль воды

гидросферы в преобразовании литосферы и в формировании полезных ископаемых. Имеющиеся экспериментальные данные об изотопном составе пород и воды в свободной и связанной форме для образцов, полученных при глубоководном бурении в Мировом океане и при бурении сверхглубоких скважин на континентах, свидетельствуют о решающей роли метеорных вод в формировании исследованных пород. Каких-либо вещественных доказательств заметного участия ювенильных вод в этих процессах не обнаружено. Напротив, накапливается всё больше фактов, свидетельствующих о решающем значении метеорных вод в течение всего геологического времени, игравших роль транспортирующего агента при круговороте углерода, серы, азота и их соединений, а также благородных газов и других летучих компонентов верхней оболочки Земли. В этой связи при исследовании задач об эволюции изотопного состава водорода, кислорода, углерода, серы и других элементов назрела необходимость системного подхода в изучении системы мантия–литосфера–гидросфера. При этом бесспорна целесообразность изучения более широкого комплекса изотопов, включая изотопы уран–ториевых рядов, стронция, хлора, азота, лития, благородных газов и долгоживущих космогенных изотопов.

С развитием методов изучения природных вод, основанных на использовании космогенных изотопов, у исследователей появилась возможность решения принципиально новых задач, связанных с изучением динамики воды в природе в региональном и глобальном масштабе в значительном временном интервале. При этом проблема времени водообмена для некоторого природного резервуара получила разрешение как на основе прямых наблюдений, так и путём модельных теоретических представлений. Возможность исследования широкого круга задач гидрометеорологии, гидрологии, гидрогеологии и океанологии является принципиально важным достоинством направления, основанного на использовании космогенных радиоактивных изотопов.

С открытием радиоактивности у исследователей наук о Земле появились «геологические часы», используемые в геохронологии. Аналогично в науках о гидросфере космогенные и радиогенные изотопы стали инструментом для определения времени водообмена в природных резервуарах. В этой связи остаётся важной проблема

дальнейшего развития методик измерения природных концентраций и выявления закономерностей распределения в природных водах таких изотопов, как  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{53}\text{Mn}$ ,  $^{85}\text{Kr}$  и др. Выполненные в этом направлении исследования являются хорошей основой для дальнейшего продолжения такой работы.

Одной из важных задач, которая нуждается в решении при использовании долгоживущих космогенных изотопов (с периодом полураспада в десятки тысяч и более лет), является выявление закономерностей их вариации во времени. Они связаны с вариациями поступления во времени потока космических лучей. Однако сами закономерности этих изменений остаются нераскрытыми.

Наконец отметим, что изучение изотопного состава воды океанов, магматических пород, вещества Луны и метеоритов, а также прогресс в развитии физических и теоретических основ динамики Земли открыли путь к решению проблемы происхождения и эволюции гидросферы с принципиально новых позиций. Вывод о конденсационном происхождении гидросферы, сделанный на основе выполненных исследований, позволяет снять многочисленные противоречия, связанные с интерпретацией экспериментальных данных об изотопном и химическом составе вещества литосферы, гидросферы и атмосферы.

Для дальнейшего расширения областей научного и практического использования изотопов назрела необходимость в расширении мониторинга как по числу исследуемых изотопов, так и по бассейнам природных вод. Такие проекты могут иметь успех лишь на основе международного сотрудничества специалистов разных стран.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Ф.А., Готтих Р.П., Саков С.А. и др. Радиохимические и изотопные исследования подземных вод нефтегазоносных областей СССР. М.: Недра, 1975. 271 с.
2. Алексеев Ф.А., Ветштейн В.Е., Малюк Г.А. Изотопный состав водорода и кислорода подземных вод Амударьинского нефтегазоносного бассейна как критерий их генезиса и динамики // Ядерная геология. М.: ВНИИЯГГ. 1974. С. 62–74
3. Бабінець А.Е., Лугова Г.П., Марус В.І. Про ізотопний склад кисню підземних вод Українських Карпат // Доповіді АН УРСР. №7, 1971. С. 579–581.
4. Батурин Г.Н. Соотношение форм миграции урана в водах некоторых рек СССР. // Докл. АН СССР. Т. 178, №3, 1968. С. 698–701.

5. Батурин Г.Н., Коченов А.В. Миграция урана в реках и время его пребывания в водах Мирового океана, морей и озёр // Геохимия. №6, 1969. С. 715–723.
6. Боревский Б.В., Каравес Б.В., Литвак Д.Р. и др. Применение радиоуглеродного метода для обоснования взаимосвязи водоносных горизонтов в районе г. Киева // Радиоизотопные методы исследований в гидро-геологии. Киев: Наукова думка, 1975. С. 17–21.
7. Буэн Р. Палеотемпературный анализ. Л.: Недра, 1969. 207 с.
8. Брезгунов В.С. Закономерности распределения стабильных изотопов водорода и кислорода природных вод при их глобальном кругообороте // Изотопия природных вод. М.: Наука, 1978. С. 10–45.
9. Брезгунов В.С., Дебольский В.К., Нечаев В.В. и др. Особенности формирования изотопного состава кислорода и солености при смешении морских и речных вод в Баренцевом и Карском морях // Водные ресурсы. №4, 1982. С. 3–14.
10. Брезгунов В.С., Нечаев В.В., Ерохин В.С. и др. Изучение распределения стабильных изотопов водорода и кислорода в бассейне озера Иссык-Куль в связи с особенностями влагооборота в Иссык-Кульской котловине // Изотопные исследования природных вод. М.: Наука, 1979. С. 61–69.
11. Брезгунов В.С., Нечаев В.В., Романов В.В., Ферронский В.И. Исследование генезиса и динамики бассейнов крупных озёр с помощью природных изотопов // Водные ресурсы. №1, 1980. С. 110–120.
12. Бродер Д.П., Голубев Л.И., Илясов В.М. и др. Распределение трития в технологических схемах Нововоронежской АЭС // Атомная энергия. Т. 46, Вып. 2, 1979. С. 120–122.
13. Бродский А.И. Химия изотопов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 595 с.
14. Буллард Э.К. Обзор представлений о тектонике плит // Нефтегазоносность и глобальная тектоника. М.: Недра, 1978. С.9–20.
15. Ветштейн В.Е., Гуцало Л.К., Малюк Г.А. и др. К вопросу о происхождении подземных вод осадочной толщи Днепрово-Донецкой нефтегазоносной провинции по данным изотопного состава кислорода и водорода // Геохимия. №3, 1973. С. 327–338.
16. Ветштейн В.Е., Малюк Г.А., Лапшин Ф.В. Ізотопний склад кисню і водню мінеральних вод Українських Карпат як критерій іх генезису // Доповіді АН УРСР. №12, 1972. С. 1062–1066.
17. Ветштейн В.Е., Малюк Г.А., Русанов В.П. Распределение кислорода-18 в воде центральной части Арктического бассейна // Океанология. Т. XIV, Вып. 4, 1974. С. 642–648.
18. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 215 с.
19. Виноградов А.П. Образование океана // Известия АН СССР. (Серия геология) №4. 1967. С. 3–9.
20. Войткевич Г.В. Проблемы радиогеологии. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 351 с.

21. Голубев Л.И., Илясов В.М., Лурье А.И., Мехедов Б.Н. Содержание трития в теплоносителе реакторов ВВЭР // Атомная энергия. Т. 46, Вып. 2, 1979. С. 79–81.
22. Горбушина Л.В., Тыминский В.Г., Спиридовонов А.И. К вопросу о механизме образования радиогидрологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значение при прогнозе землетрясений.// Сов. геология. №1, 1972. С. 153–156.
23. Горбушина Л.В., Тыминский В.Г. Радиоактивные и стабильные изотопы в геологии и гидрологии. М.: Атомиздат, 1974. 104 с.
24. Гордиенко Ф.Г., Котляков В.М. О соотношении климатического и гляциологического факторов формирования палеотемператур материальных ледников // Проблемы палеогидрологии. М.: Наука, 1976. С. 282–283.
25. Гритченко З.Г., Флегонтов В.М., Флейшман Д.Г. Радиоактивные выпадения  $^{7}\text{Be}$  и  $^{22}\text{Na}$  в районе Ленинграда в 1960–1973 гг. // Космогенные радиоактивные изотопы. Вып.3. Вильнюс: Изд-во ИФМ АН ЛитССР. 1975. С. 71–81
26. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976.
27. Дергачев В.А., Кочаров Г.Е. Вековой цикл временных вариаций концентрации радиоуглерода в атмосфере Земли // Low-radioactivity measurements and applications. Proc. Symp. 1977. Р. 279–286.
28. Клеро А.К. Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики / Пер. с франц. М.; Л., АН СССР, 1947.
29. Коченов А.В., Батурина П.Н. Распределение урана в осадках Аральского моря // Океанология. Т. 7, Вып. 4, 1967. С. 623–627.
30. Кочерав Г.Е. Изотопный состав корпуксуллярных потоков Солнца и земной атмосферы // Космогенные радиоактивные изотопы. Вып. 3. Вильнюс: ИБ АН ЛитССР. 1975. С. 5–16.
31. Кузнецов Ю.В., Легин В.К., Лисицын А.Р. и др. радиоактивность океанических взвесей. 2. Уран в океанических взвесях // Радиохимия. Т. 9, Вып. 4, 1967. С. 498–499.
32. Куприн П.Н., Ферронский В.И., Поповчак В.П. и др. Состав донных осадков Каспийского моря как показатель изменения его водного режима. // Водные ресурсы. Т. 30. №2. 2003. С. 154–172.
33. Ле Пишон К., Франшто Ж., Боннин Ж. Тектоника плит. М.: Мир, 1977. 287 с.
34. Луянас В.Ю. К вопросу о скорости возникновения космогенных радионуклидов // Космогенные радиоактивные изотопы. Вып. 3. Вильнюс: ИФМ АН ЛитССР. 1975. С.17–25.
35. Мельхиор П. Физика и динамика планет / Пер. с франц. М: Мир, 1976.
36. Муди Дж. Размещение и особенности геологического строения нефтяных месторождений-гигантов // нефтегазоносность и глобальная тектоника. М.: Недра, 1978. С. 209–220.
37. Пельмегов С.В., Мунаев Э., Бондаренко Г.Н. Изотопно-геохимические исследования подземных вод в краевой части артезианского бассейна // Сов. геология. №4, 1978. С. 119–125.

38. Пиннекер Е.В. Значение изотопных определений при изучении месторождений подземных вод (на примере Восточной Сибири) // Месторождения подземных вод Иркутской области. Л.: Недра, 1974. С. 14–31.
39. Пиннекер Е.В. Формирование современных гидротерм в областях потухшего вулканизма (в свете изотопных данных) // Гидротермальный процесс в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1975. С. 38–43.
40. Пиннекер Е.В., Ветштейн В.Е., Дзюба А.А. и др. Содержание кислорода-18 в рассолах Сибирской платформы // Очерки по гидрогеологии Сибири. Новосибирск: Наука, 1973. С. 86–92.
41. Поляков В.А., Селецкий Ю.Б., Якубовский А.В. и др. Дейтерий в водах типа «Нафтуся» // Тр. ВСЕГИНГЕО. Вып. 59. М.: Недра, 1974. С. 80–87.
42. Романов В.В. Закономерности распределения трития в природных водах // Изотопия природных вод. М.: Наука, 1978. С. 46–89.
43. Романов В.В. Применение природного трития для изучения перемешивания морских и речных вод // Водные ресурсы. №5, 1982. С. 22–26.
44. Романов В.В., Кикичев Х.Г. Тритий в атмосферном водороде // Изотопные исследования природных вод. М.: Наука, 1979. С. 85–92.
45. Романов В.В., Кикичев Х.Г. Определение доли морского и континентального водяного пара в приземном слое воздуха северо-западной акватории Чёрного моря с помощью тритиевых исследований // Исследование природных вод изотопными методами. М.: Наука, 1981. С. 111–114.
46. Селецкий Ю.Б., Поляков В.А., Якубовский А.В. и др. Дейтерий и кислород-18 в подземных водах. М.: Недра, 1973. 144 с.
47. Сойфер В.Н., Брезгунов В.С., Верболов В.И. и др. Применение изотопного метода для изучения процессов водообмена озера Байкал // Тр. Лимнол. ин-та СО АН СССР. 1970. Т. 14. С. 146–153.
48. Соколовский Л.Г., Поляков В.А., Голубкова Е.В. Изотопно-лёгкие воды Азово-Кубанского артезианского бассейна: условия формирования и бальнеологическое значение // Разведка и охрана недр. №5. 2007. С. 44–47.
49. Стариц И.Е., Колядин Л.Б. Об условиях существования урана в океанической воде // Геохимия. №3, 1957. С. 204–213.
50. Стыро Б.И. Самоочищение атмосферы от радиоактивных загрязнений. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 288 с.
51. Стыро Б.И., Шпиркаускайте И.К., Купцов В.М. Высотные распределения  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{239}\text{Pu}$  в атмосферных выпадениях // Атомная энергия. Т. 29, Вып. 2, 1970. С. 135–136.
52. Тарасов М.Г. Вопросы происхождения и формирования вод мезокайнозойских отложений Предкавказью по данным изотопного состава водорода и кислорода // Материалы геологического изучения земной коры Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1978. С. 62–68.
53. Тейс Р.В., Найдин Д.П. Палеотермометрия и изотопный состав кислорода органогенных карбонатов. М.: Наука, 1973. 254 с.

54. Ткачук В.Г., Ветштейн В.Е., Малюк Г.А. и др. Изотопный состав водорода и кислорода подземных рассолов Припятской впадины и возможности его использования в нефтегазовой гидрогеологии // Геохимия. №7, 1975. С. 999–1006.
55. Ферронский В.И. О происхождении гидросферы земли по данным об изотопном составе воды // Водные ресурсы. №4, 1974. С. 21–34.
56. Ферронский В.И. Неусреднённая теорема вириала для природных систем // Электронный журнал МФТИ «Исследовано в России». Веб-сайт: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2008/066.pdf> (С. 712–715 русская версия. С. 716–719 английская версия).
57. Ферронский В.И., Брезгунов В.С., Власова Л.С. и др. Исследование водообменных процессов в Каспийском море на основе изотопных и океанографических данных. // Водные ресурсы. Т. 30, №1, 2003, С. 15–28.
58. Ферронский В.И., Брезгунов В.С., Власова Л.С. и др. Изменение водного режима зал. Кара-Богаз-Гол, оз. Иссык-Куль и Аральского моря по данным изучения донных осадков. // Водные ресурсы. Т. 30, №3, 2003. С. 281–288.
59. Ферронский В.И., Власова Л.С., Есиков А.Д. и др. Вариации изотопного состава подземных вод, атмосферных осадков и органического вещества аллювиальных отложений в связи с колебаниями климата // Водные ресурсы. №5, 1982. С. 3–25.
60. Ферронский В.И., Иванова Л.Ю., Кикичев Х.Г. и др. О возможностях использования трития для изучения глобальных циркуляций атмосферной влаги // Водные ресурсы. №5, 1980. С. 144–152.
61. Ферронский В.И., Данилин А.И., Дубинчук В.Т. и др. Радиоизотопные методы исследования в инженерной геологии и гидрогеологии. М.: Атомиздат, 1977. 308 с.
62. Ферронский В.И., Дубинчук В.Т., Поляков В.А. и др. Природные изотопы гидросферы. М.: Недра, 1975. 278 с.
63. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. М.: Научный мир, 2009. 632с.
64. Ферронский В.И., Поляков В.А., Куприн П.Н., Лобов А.Л. Природные колебания уровня Каспийского моря (по результатам изучения донных осадков) // Водные ресурсы. Т. 26, №6, 1999. С. 652–666.
65. Ферронский В.И., Поляков В.А., Романов В.В. Космогенные изотопы гидросферы. М.: Наука, 1984. 278 с.
66. Ферронский В.И., Ферронский С.В. Происхождение и эволюция Солнечной системы. М.: Научный мир, 2012. 288 с.
67. Ферронский В.И. Гравитация, инерция, невесомость. М.: Научный мир, 2016. 306 с.
68. Ферронский В.И., Поляков В.А., Ферронский С.В. Вариации изотопного состава воды в гидрологическом цикле как инструмент изучения механизма климатических изменений // Водные ресурсы. №3, 1993. С. 285 – 295.
69. Ферронский В.И., Ферронский С.В. Динамика Земли. М.: Научный мир, 2007. 336 с.

70. Ферхуген Дж. Тернет Ф., Вейс Л. и др. Земля: Введение в общую геологию. Т. 2. М.: Мир, 1974. С. 389 –483.
71. Чердынцев В.В. Уран-234. М.: Атомиздат, 1969. 308 с..
72. Alder B., Oeschger H., Wasson Y.T. Aluminium-26 in deep-sea sediments // Radioactive dating and methods of low-level counting. Proc. Symp. IAEA. 1967. P. 189–195.
73. Appa Rao M.V.K. The  ${}^3\text{He}({}^3\text{He}+{}^4\text{He})$  ratio in primary cosmic radiation // J. Geophys. Res. V. 67, 1962. P. 1289–1392.
74. Bentley H.W., Phillips F.M., Davis S.N. et al. Chlorine-36 dating of very old groundwater. 1. The Great Artesian Basin, Australia. // Waret Resour. Res. V. 22, 1986. P. 1991 – 2001.
75. Bien G.S., Suess H.E. Transfer and exchange of  ${}^{14}\text{C}$  between the atmosphere and the surface water of the Pacific Ocean // Radiocarbon Dating and Methods of Low-Level Counting. Proc. Symp. IAEA. 1967. P. 105–115.
76. Bochaler P., Eberhardt P., Geiss J. at al. Tritium in lunar materials // Proc. 2<sup>nd</sup> Lunar Sci. Conf. V. 2, 1971. P. 1803–1812.
77. Bowen R. Isotopes and climayes. London: Elsevier, 1991. 483 p.
78. Cambray R.S., Fishar E.M., Peirson D.H. et al. Radioactive fallout in air and rain: results to end of 1978. Harwell: AERE. R-9441. 1979. 50 p.
79. Cameron A.G.W. Accumulation processes in the primitive Solar nebulae // Icarus. V. 18, 1973. P. 407–450.
80. Cameron A.G.W., Pine M.R. Numerical models of the primitive Solar nebulae // Ibid. V. 18, 1973. P. 377–406.
81. Cotecchia V., Tasioli G.S., Vaari G. Isotopic measurements in research on seawater ingressions in the carbonate aquifer of the Salentine peninsula, Southern Italy // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA, V.1, 1974. P. 445–463.
82. Craig H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide // Geochim. et Cosmochim. Acta. V. 12, 1957. P.133–149.
83. Craig H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters // Ibid. V. 133, 1961 b. P. 1833–1834.
84. Craig H., Gordon L. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere // Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. Spoleto, 1965. P. 9–130.
85. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. V. 19, 1964. P. 435–463.
86. Dansgaard W., Johnson S.J., Müller J. et al. One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet // Science. V. 166, 1969. P. 377–380.
87. Dinzer T., Noory M., Javed A.R.K. et al. Study of groundwater recharge and movement in shallow and deep aquifers in Saudi Arabia with stable isotopes and salinity data // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA, V.1, 1974. P. 364–374.
88. Dinzer T., Payne B.R. An environmental isotope study of the southwestern karst region of Turkey // J. Hydrol. V. 13, 1971. P. 233–258.
89. Drost W., Mozer H., Neumaier F. et al. Isotopenmethoden in der Grundwasserkunde. // Inf. 61, Бъло Еурисотоп. Brussels. 1972. S. 178.

90. Dudey N.D., Malewski R.L., Ryman S.L. Tritium yield from fast-neutron fission of  $^{235}\text{U}$  // Trans. Amer. Nucl. Soc. V. 15, 1972. P. 483.
91. Emiliani C. Pleistocene paleotemperatures // Science. V. 168, 1970. P. 822–824.
92. Emiliani C. The cause of the ice ages // Earth and Planet. Sci. Lett. V. 37., 1978. P. 349–352.
93. Epstein S., Mayeda T. Variation of  $^{18}\text{O}$  content of waters from natural sources // Geochim. et Cosmochim. Acta. V. 4, 1953. P. 213–214.
94. Epstein S., Buchbaum R., Lowenstam L., Urey H. Carbonate-water isotopic temperature scale // Bull. GSA. V. 62, 1951. P. 417–426.
95. Epstein S., Buchbaum R., Lowenstam L., Urey H. Revised carbonate-water isotopic temperature scale // Ibid. V. 64, 1953. P. 1315–1325.
96. Epstein S., Sharp R.P., Gow A.J. Antarctic ice sheet: stable isotope analyses of Bird Station cores and interhemispheric climatic implications // Science. V. 168, 1970. P. 1570–1572.
97. Fairbridge R.W. The importance of limestone and its Ca/Mg content to paleoclimatology // Intersciences Letters. 1964. P. 431–478.
98. Fairhall A.W., Buddemeir R.W., Yang I.A., Young Y.A. Radiocarbon from nuclear testing and air-sea exchange of  $\text{CO}_2$  // Antarctic J. V. 4, 1969. P. 14–18.
99. Fairhall A.W., Young Y.A. Radiocarbon in the environment // Radionuclides in the Environment. Adv. Chem. Ser. № 93. Am. Chem. Soc. 1969. P. 401–418.
100. Fireman E.L. Radioactivities in meteorites and cosmic-ray variation // Geochim. et Cosmochim. Acta. V. 31, 1967. P. 1197–1206.
101. Fireman E.L., Stoenner R.W. Carbon and carbon-14 in lunar soil 14163 // Proc. 12 Lunar and Planet Sci. Conf. N.Y.: V. 12, 1982. P. 559 – 565.
102. Fontes J.Ch. Les isotopes du milieu dans les laux naturells // Le Houille Blanche. № s, 1976. P. 205–221.
103. Friedman I., Hardcastle K. Interstitial water studies, Leg. 15, isotopic composition of water // Initial Rep. DSDP. 1973. V. 20. p. 901–903.
104. Friedman I., Redfield A.C., Schoen B. et al. The variation of the deuterium content of natural waters in the hydrologic cycle // Rev. Geophys. V. 2, 1964. P. 177–224.
105. Fritz P., Drimmie R.J., Render F.W. Stable isotope contents of a major prairie aquifer in central Manitoba, Canada // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology // Proc. Symp. IAEA, V. 1, 1974. P. 379–396.
106. Fröhlich K., Jordan H., Herbert D. Radioactive Umveltisotope in der Hydrologie. Leipzig: Grundstoffindustrie, 1977. 92 s.
107. Gat J.R., Carmi I. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area // J. Geophys. Res. V. 75, 1970. P. 3039–3078.
108. Gat J.R., Tzur Y. Modification of the isotopic composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge // Isotope Hydrology. Proc. Symp. IAEA. 1967. P. 49–60.
109. Gat J.R., Gonfiantini R., Tongiorgi E. Atmosphere-surface water interaction // Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. IAEA. 1968. P. 175–184.

110. Gillespie R., Polach Y.A. The suitability of marine shells for radiocarbon dating of Australian prehistory // Radiocarbon Dating. Berkeley: Univ. Calif. Press, 1979. P. 404–421.
111. Gonfiantini R., Dinzer T., Derekoy A.M. Environmental isotope hydrology in the Bodna region, Algeria // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA. V. 1, 1974 a. P. 293–316.
112. Gonfiantini R., Conrad C., Fontes J.Ch. et al. Etude isotopique de la nappe du Continental intercalaire et de ses relations avec les autres nappes du Sahara septentrional // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA. V. 1, 1974 b. P. 227–240.
113. Gonfiantini R., Gallo G., Payne B.R. et al. Environmental isotope and hydrochemistry in groundwater of Gran Canaria // Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology // Adv Group Meet. Vienna: IAEA. 1976. P. 159–170.
114. Gray D.C., Damon P.E. Sunspots and radiocarbon dating in the Middle ages // Scientific Methods In Medieval Archeology. Berkley: Univ. Calif. Press, 1970. P. 167–182.
115. Hagemann F.J., Grey J., Machta L., Turkevich A. Stratospheric carbon-14, carbon dioxide, tritium // Science. V. 130, 1959. P. 542–552.
116. Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry. N.Y.: Springer, 1973. 135 p.
117. Imbrie J. A theoretical framework for the Pleistocene in ages. // Journal Geol. V.142, 1985. P. 417–432.
118. Jeffreys H. The Earth: Its origin, history and physical constitution (5<sup>th</sup> ed.) Cambridge Press. 1919.
119. Keeling C.D. The carbon dioxide cycle: reservoir models to depict the exchange of atmospheric carbon dioxide with oceans and land plants // Chemistry of the lower atmosphere. N.Y.: Plenum Press, 1972. P. 251–329.
120. Kinman T.D. An attempt to detect deuterium in the solar atmosphere // Month. Not. Roy. Astrophys. Soc. V. 116, 1956. P. 77.
121. Klein F., Sommerfeld A. Theorie des Kreisels. Hefte III, Leipzig: Teubner, 1903.
122. Lal D., Peters B. Cosmic-ray-produced radioactivity on the Earth // Encycl. Phys. V. 46, 1967. P. 551–612.
123. Lal D., Nijampurkar V.N., Rama S. Silicon-32 hydrology // Isotope Hydrology. Proc. Symp. IAEA. 1970. P. 847–863.
124. Libby W.F. Radiocarbon Dating. Chicago: Univ. Press, 1955. 186 p.
125. Locante J. Tritium in pressurized water reactor // Trans. Amer. Nucl. Soc. V. 14, 1971. P. 161–162.
126. Merlivat L. D'étude quantitative de bilans de lacs à l'aide des concentrations en deuterium et oxygen-18 dans lean // Isotope Hydrol. Proc. Symp. Vienna: IAEA, 1970. P. 89–107.
127. Miskel J.A. Production of tritium by nuclear weapons // Tritium. Eds. A. Moghissi and M. Carter. Phoenix: Las Vegas. Messenger Graphics, 1973. P. 79–85.
128. Müller P., Wagner K. Dating soil layers by  $^{10}\text{B}$  // Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting. Proc. Symp. IAEA. 1967. P. 177–187.
129. Mook W.G. Stable carbon and oxygen isotopes in natural waters in the Netherlands // Isotope Hydrol. Proc. Symp. IAEA. 1970. P. 163–189.

130. Мъннич К.О., Vogel J.C. Investigation of meridional transport in the troposphere by means of carbon-14 measurements // Radiocarbon Dating. Proc. Symp. IAEA. 1963. P. 189–197.
131. Nydal R., Ljvseth K., Gulliksen S. A survey of radiocarbon variation in nature since the Test Ban Treaty // Radiocarbon Dating. Berkely: Univ. Calif. Press, 1979. P. 313–323.
132. O'Neil J.R. Stable isotope geochemistry of rocks and minerals // Lectures in Isotope Geology. Eds. E. Jager, J.C. Hunziker. N.Y.: Springer, 1979. P. 235–263.
133. Panichi C., Ferrara G.C., Gonfiantini R. Isotope geothermometry in the Larderello geothermal field // Geothermics. V. 5, 1977. P. 81–88.
134. Panichi C., Nuti S., Noto P. Use of isotopic geothermometers in the Larderello geothermal field // Isotope Hydrology. Proc. Symp. IAEA. V. 2, 1979. P. 613–629.
135. Redfield A.C., Friedman I. Factors affecting the distribution of deuterium in the ocean // Proc. Symp. Mar. Geochim. 1964. P. 149–168.
136. Sakai H., Matsubaya O. Stable isotope studies of Japanese geothermal systems // Ibid. V. 5, 1977. P. 97–123.
137. Salati E., Leal J.M., Campos M.M. Environmental isotopes used in a hydrological study of Northeastern Brazil // Isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Proc. Symp. IAEA. V. 1, 1974. P. 259–282.
138. Savin S.M. The history of the Earth's surface temperature during the past 100 m.y. // Ann. Rev. Earth. Planet. Sci. V. 5, 1977. P. 319–355.
139. Schmidt U. Molecular hydrogen in the atmosphere // Tellus. V. 26, 1974. P. 78–90.
140. Sehgal B.R., Remport H.H. Tritium production in fast reactors, containing  $B_4C$  // Trans. Amer. Nucl. Soc. V. 14, 1971. P. 779–780.
141. Sternberg R.S., Damon P.E. Sensitivity of radiocarbon fluctuations and inventory to geomagnetic and reservoir parameters // Radiocarbon Dating. Berkely: Univ. Calif. Press, 1979. P. 691.
142. Stuiver M., Suess H.E. On the relations between radiocarbon dates and true sample ages // Radiocarbon. V. 8, 1966. P. 534–540.
143. Suess H.E. Tritium geophysics as an international research project // Science. V. 163, 1969. P. 1705–1410.
144. Taylor J.R., Pefers F.E. Tritium transport in LMFBR's // Trans. Amer. Nucl. Soc. V. 15, 1972. P. 431–432.
145. Thatcher L.L., Payne B.R. The distribution of tritium in precipitation over continents and its significance to groundwater dating // Radiocarbon and Tritium Dating. Proc. 6<sup>th</sup> Inter. Conf. Wash.: USAEC. 1965. P. 604–629.
146. Webber W. The spectrum and charge composition of the primary cosmic radiation // Encycl. Phys. V.46, 1967. P. 181.
147. Yurtsever Y., Gat J.R. Stable isotopes in atmospheric waters // Stable Isotope Hydrology. Eds. J.R. Gat and R. Gonfiantini. Vienna: IAEA, 1981. P. 103–142.
148. Yurtsever Y., Payne B.R. Application of environmental isotopes to groundwater investigations in Qatar // Isotope Hydrology 1978. Pros. Symp. IAEA. V. 2, 1979. P. 465–490.

# СТОХАСТИЧЕСКАЯ ГИДРОЛОГИЯ

## Развитие идей стохастической гидрологии в ИВП РАН

М.В. Болгов

Методы гидрологии, основывающиеся как на генетических представлениях о формировании стока, так и на вероятностных моделях его пространственно-временной изменчивости, получили существенное развитие благодаря работам С.Н. Крицкого, М.Ф. Менкеля, Д.В. Коренистова, Е.Г. Блохинова, И.О. Сарманова, Д.Я. Ратковича, В.Е. Привальского и многих других учёных и инженеров Института водных проблем АН СССР и РАН за 50 лет его существования.

Во многих классических работах прошлого столетия была доказана стохастическая природа гидрометеорологических процессов, предопределяющая необходимость их вероятностного описание во времени и пространстве. Большое значение для развития стохастической гидрологии в последние десятилетия имела разработка в ИВП теории корреляции для негауссовых процессов, к которым относятся все составляющие водного баланса, в том числе речной сток. Существенный прогресс в области построения стохастических моделей стока связан с циклом работ О.В. Сарманова [1, 2], начатых в Математическом институте им. Стеклова, и получивших развитие в Институте водных проблем [4]. О.В. Сарманов представил решение уравнения Маркова в виде билинейного разложения по собственным функциям ядра интегрального уравнения. На основе этой работы И.О. Сармановым была доказана фундаментальная теорема, являющаяся основой создания теории нестационарных марковских гамма-процессов, названных автором процессами винеровского типа [4]. Полученные двумерные плотности позволяют построить семейство трёхпараметрических гамма-корреляций, определяющих марковские гамма-процессы.

Из числа других стохастических моделей, развивавшихся применительно к многолетним колебаниям стока рек, в том числе и в ИВП, следует отметить процессы авторегрессии и скользящего среднего. Следует отметить цикл работ В.Е. Привальского с соавторами [5].

Из безусловных законов распределения величин речного стока обсуждались, в основном, различные модификации гамма-распре-

деления, среди которых необходимо указать в первую очередь распределение Крицкого и Менкеля, получаемое путем степенной замены переменной в гамма-распределении. Из числа трудностей, до конца не преодолённых для безусловных законов, следует упомянуть проблему усечения распределений. Гидрологическая значимость теории усечённых распределений определяется возможностью обработки генетически неоднородных совокупностей. Для гамма-распределенных величин Е.Г. Блохиновым [6], а затем Л.Ф. Сотниковой [7] исследовался случай усечения в медиане (точке с обеспеченностью 50%). Усечение трёхпараметрического распределения в произвольной точке рассмотрено в работе М.В. Болгова и И.О. Сарманова [8].

Следующий важный аспект стохастической гидрологии – применение моделированных рядов составляющих водного баланса в гидрологических и водохозяйственных расчётах. Начало этим исследованиям было положено в нашей стране работами Г.Г. Сванидзе [9], А.Ш. Резниковского [10], А.В. Рождественского [11], но в работах Д.Я. Ратковича [12, 13] предложен метод моделирования, отвечающий рекомендуемой им модели: линейной корреляции между обеспеченностями стока смежных лет. При необходимости моделирования системы взаимозависимых рядов расчеты существенно усложняются; Способ моделирования многомерных случайных величин был также предложен Д.Я. Ратковичем [13] и развит далее С.В. Музылёвым и А.В. Фроловым [14], М.В. Болговым [15]. В основу предлагаемого приёма положена идея привести исходную задачу к моделированию вспомогательных автокоррелированных, но взаимонезависимых последовательностей.

Использование в гидрологических и водохозяйственных расчётах стохастических моделей связано с определением (оценкой) их параметров по рядам наблюдений ограниченной продолжительности (в гидрологии, как правило, менее 100). Исследование статистических свойств оценок параметров и разработка методов, позволяющих получать «наилучшие» результаты, составляет важнейший этап гидрологического расчёта.

Оценкам параметров распределений свойственны как систематические ошибки (смещение), так и случайные. Очевидно, нужно стремиться к получению несмешённых оценок при минимальных

случайных ошибках. Теория оценивания параметров распределения вероятностей, применительно к задачам гидрологии, рассматривалась в ряде работ ИВП [6, 16]. В последние годы исследовался вопрос оценивания параметров распределения Крицкого и Менкеля методом линейных моментов Хоскинга [17].

При описании экстремальных величин стока основные трудности возникают при оценивании асимметрии. С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем [18] показано, что существенное уточнение в ряде случаев достигается при совокупном (групповом) анализе материалов наблюдений. Объединённый анализ гидрологических и метеорологических наблюдений, относящихся к различным объектам, имеет целью установить общие всем объектам рассматриваемой группы закономерности, проявляющиеся в колебаниях величин стока, атмосферных осадков и т.п. Это позволяет увеличить объём эквивалентно независимой информации, содержащейся в объединяемых данных наблюдений, по которым оцениваются характеристики гидрологического режима. В результате, несмотря на внесение в расчёт некоторых условностей и допущений, можно при определённых соотношениях повысить точность гидрологического расчёта.

Рассмотрим основные результаты более подробно.

### **Марковские стохастические модели внутрирядной корреляции стока рек**

Процессы Маркова являются математической моделью, достаточно адекватно отражающей свойства реальных процессов, с одной стороны, а с другой – удобным средством для различного рода расчётов. В работах Института рассматривалась следующая задача. При заданном одномерном (маргинальном) распределении  $p(x)$  и степенном характере затухания корреляций построить согласованную с ними двумерную плотность  $p(t, x, y)$ . Решение этой задачи основывается на фундаментальном результате О.В. Сарманова [2], который формулируется в следующем виде:

Для того, что бы плотность  $p(t, x, y)$  стационарного случайного процесса удовлетворяли уравнению Маркова с заданными маргинальными распределениями, достаточно, что бы она имела вид

$$p(t, x, y) = p(x)p(y) \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\lambda_k t} \varphi_k(x)\varphi_k(y) \right], \quad (1)$$

где  $0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots$  любая монотонная числовая последовательность (необязательно бесконечная), а  $\varphi_k(x)$  – ортонормированная с весом  $p(x)$  система собственных функций интегрального оператора

$$\int_{\Omega} \frac{p(t, x, y) \varphi(x) dx}{\sqrt{p(x)p(y)}} = \lambda \varphi(y), \quad y \in \Omega, \quad (2)$$

Область  $\Omega$  изменения аргументов  $x$  и  $y$  совпадает с областью значений случайного процесса  $x(t)$ . При этом  $\lambda_k$  – соответствующие собственные значения.

В работах ИВП РАН исследовались следующие конкретные двумерные законы распределения: гамма-распределение и равномерное распределение.

Билинейное разложение по полиномам Лагерра [19].

$$f_1(x, y) = \frac{x^\alpha e^{-x}}{\Gamma(\alpha+1)} \frac{y^\alpha e^{-y}}{\Gamma(\alpha+1)} \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} R^k L_k^\alpha(x) L_k^\alpha(y) \right], \quad (3)$$

где  $R = \exp(-\lambda)$  – коэффициент корреляции между гамма-распределенными величинами.

Билинейное разложение по полиномам Лежандра.

Пусть  $x$  и  $y$  – случайные величины, имеющие каждая равномерное распределение в промежутке  $[-1, 1]$  и соответственно плотности  $f_1(x)=1/2$ ,  $f_2(x)=1/2$ . Ограничимся в билинейном разложении по системе ортонормированных полиномов Лежандра первыми тремя членами. В таком случае двумерная плотность записывается в виде [20]:

$$f(u, v) = 1 + 3\lambda(2u-1)(2v-1) + \frac{5}{4}\lambda^2[3(2u-1)^2-1][3(2v-1)^2-1], \quad (4)$$

где  $\lambda = \exp(-\alpha)$  – коэффициент корреляции равномерно распределенных в  $[-1, 1]$  случайных величин. И.О. Сармановым [20] показано, что разложение (4) сохраняет вероятностный смысл при выполнении следующего условия:

$$-0,55 \leq \lambda \leq 0,55.$$

Условная функция распределения записывается в виде:

$$F(u, v) = u + 3\lambda(2u-1)(u^2-u) + \frac{5}{4}\lambda^2[3(2u-1)^2-1](2u^3-3u^2+u). \quad (5)$$

Условная дисперсия не зависит от  $v$ , и, следовательно, корреляция (4) гомоскедастична.

Переход от корреляции равномерно распределенных величин к корреляции с заданными маргинальными распределениями рассмотрен И.О. Сармановым [21]. Пусть  $f(u, v)$  – двухмерная плотность для системы равномерно распределенных в  $[0, 1]$  случайных зависи-

мых величин  $\xi_1$ ,  $\eta_1$ . Рассмотрим случайные величины  $\xi$ ,  $\eta$ , задаваемые равенствами

$$\xi_1 = \int\limits_{\alpha}^{\xi} p(x)dx = F(\xi), \quad \eta_1 = \int\limits_{\alpha}^{\eta} p(y)dy = F(\eta), \quad (6)$$

где  $p(x)>0$  – заданная плотность распределения в отрезке  $[a, b]$ . В таком случае плотность  $f_1(x, y)$  определяется в виде билинейного разложения:

$$f_1(x, y) = p(x)p(y) \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda^k P_k[F(x)]P_k[F(y)] \right\}. \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент корреляции между  $F(\xi)$  и  $F(\eta)$ , а  $P_k()$  –  $k$ -тый полином Лежандра.

Начиная с работ Ефимовича, Крицкого, Менкеля, последовательности годовых значений речного стока принято рассматривать как реализации марковского процесса. Поскольку корреляционная теория случайных процессов развивалась в те годы в основном для гауссовского случая, то и заимствованные гидрологией методы либо ограничивались нормальным приближением, либо основывались на преобразовании классического нормального закона распределения (А.В. Рождественский, 1977; В. Клемеш, 1974; Н.А. Картвелишвили, 1975)..

В целом марковская модель может быть принята в качестве практически приемлемого приближения для многолетних колебаний стока, но желательно выяснить, какое из марковских решений наилучшим образом удовлетворяет имеющимся натурным данным. С целью обоснования приемлемой модели колебаний стока Д.Я. Ратковичем [12], был выполнен сравнительный анализ массовых материалов наблюдений за стоком неозёрных рек Земного шара с использованием последовательности независимых случайных величин и четырех модификаций простой цепи Маркова. Исследования Ратковича показали, что наилучшее приближение к натуре даёт модификация простой цепи Маркова с линейной корреляцией между обеспеченностями последовательных величин стока.

Важнейшее значение в задаче идентификации стохастической модели стока имеет определение числового параметра рекомендуемой модели – коэффициента автокорреляции, выборочные оценки которого, при коротких рядах наблюдений, статистически мало

достоверны. Ратковичем было выдвинуто предположение о допустимости нормировать коэффициент автокорреляции в зависимости от какой-то интегральной характеристики, по возможности отражающей влияние всех указанных причин, вызывающих коррелированность рядов годового стока. Обобщение материалов наблюдений за стоком около 400 рек Земного шара позволило установить [12], что для неозёрных рек наиболее отчётливо прослеживается зависимость первого коэффициента автокорреляции ( $r(1)$ ) от модуля стока. Эта идея получила подтверждение в последующих работах, в которых методом совместного анализа были получены региональные оценки ( $r(1)$ ). Сравнение осреднённых для регионов РФ значений модулей и коэффициентов автокорреляции подтвердило наличие такой зависимости [24].

### **Периодически коррелированные стохастические модели сезонных колебаний стока**

Успехи стохастического направления в начальный период работы ИВП связаны, в основном, с исследованиями колебаний годового стока и колебаниями уровней замкнутых морей. Однако во многих случаях сезонный ход процессов становится определяющей характеристикой гидрометеорологического режима.

В работах специалистов Института рассматривались весьма разнообразные по сложности предложения по моделированию гидрологических процессов с сезонным ходом. Большое число подходов к этой проблеме рассмотрено в работе В.Е. Привальского и др.[5]. Упомянутые модели с различной степенью достоверности воспроизводят свойства натурных рядов. Однако, в отличие от стохастических моделей годового стока, при исследовании его сезонного хода практически не изучались степень соответствия натурным данным как двумерных, так и многомерных моделей (законов распределения), а также свойства стохастических моделей, за некоторым исключением, не обсуждается вопрос об их оптимальной сложности.

Теоретически задача построения стохастической модели стока не имеет единственного решения уже на уровне двумерных законов распределения (при заданных одномерных), что в сочетании с негауссостью последних требует тщательного исследования как свойств самих моделей, так и оценки их адекватности натурным данным.

При стохастическом моделировании речного стока с интервалом дискретности менее года целесообразно рассматривать его как нестационарный случайный процесс с параметрами, период изменения которых равен 12 месяцам. Первая и весьма важная проблема – нормализация распределений стока, так как распределения вероятностей среднемесячных расходов характеризуются повышенной асимметрией и удовлетворительно аппроксимируются трёхпараметрическим гамма-распределением Крицкого–Менкеля.

Переход от гамма-распределенных величин к нормально распределённым возможен несколькими способами. Одним из наиболее распространённых является приём, сводящийся к вычитанию сезонного хода из натурного ряда и последующему нормированию. Получающийся после таких преобразований ряд рассматривается как стационарный и представляется в виде обычной авторегрессионной модели.

$$Q_t = \Phi_1 Q_{t-1} + \dots + \Phi_p Q_{t-p} + \zeta_t \quad (8)$$

где  $\zeta_t$  – взаимонезависимые и одинаково распределённые гауссовские случайные величины. В таком случае говорят об авторегрессионной модели с сезонным ходом (САР-модель по терминологии [5]).

Естественное усложнение САР-модели состоит в подгонке авторегрессионной модели, своей для каждого месяца. Оценив авторегрессионные параметры и дисперсию ошибки аппроксимации для каждого месяца, получим периодическую авторегрессионную модель (ПАР-модель).

Вид выборочных АКФ показывает, что для каждого месяца необходимо выбирать (назначать) свой порядок сложности модели. При наличии значимой автокорреляции стока смежных лет ( $r(1)>0,2$ ), а это реки большей части территории бывшего СССР, порядок моделей отдельных месяцев должен в нашем случае назначаться исходя из сохранения заданного коэффициента корреляции между годовыми значениями (Сванидзе, 1977, Болгов, 1996).

Вид автокорреляционных функций периодически коррелированного процесса колебаний речного стока весьма сложен ввиду генетической неоднородности его составляющих в различные сезоны года и чисто марковская модель не может быть использована. Тем не менее на «Марковской» основе было предложено усложне-

ние простейшей модели. Автокорреляционные функции периодов устойчивого питания для исследуемых районов характеризуются быстрым убыванием до сдвига по времени, равного единице, а затем более замедленным спадом. В таком случае можно рекомендовать стохастическую модель в виде смеси двух процессов – простой цепи Маркова и последовательности независимых случайных величин (белый шум). Для половодных месяцев можно ограничиться одним из этих компонентов.

Таким образом, для стохастического описания колебаний стока с интервалом дискретности один месяц рекомендуется модель в виде суммы двух процессов – марковской последовательности и белого шума [25].

Итак, обратимся к автокорреляционной функции. Рекомендуемой модели соответствует следующее аналитическое выражение

$$R(\tau) = ae^{-\alpha\tau} + (1-a)\delta(\tau). \quad (9)$$

Выражение (9) содержит два параметра –  $a$  и  $\alpha$ , которые необходимо определять методом наименьших квадратов с использованием ординат автокорреляционной функции за предшествующий период, равный году. Как показали имитационные эксперименты, сохранение в модели медленного затухания корреляционной функции для стока периодов устойчивого питания является необходимым условием воспроизведения свойств колебаний стока во всем интервале частот (в диапазонах многолетних и сезонных колебаний).

### **Усечённое трёхпараметрическое гамма-распределение**

**С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкея**

Получение одномерных распределений вероятностей стока является важнейшей задачей стохастической гидрологии. В связи с ограниченностью анализируемых выборок в данной задаче гидрологии реализуется весьма консервативный подход, поскольку её решение в существенной мере определяет надёжность проектируемых сооружений. Тем не менее гидрологи весьма часто оздачиваются проблемой поиска распределений, наилучшим образом удовлетворяющих имеющимся эмпирическим данным. Известны попытки А.В. Ежова построить распределение на основе принципа максимума энтропии [26], а также некоторые другие подходы. Функции распределения с «тяжёлым» хвостом были получены В.И. Найдёновым

при попытке учесть механизм обратной связи в уравнении водного баланса, обобщённые кривые Г.П. Калинина [28] основывались на аппроксимации обширного эмпирического материала. Н.А. Картвелишвили [23] рассмотрел обобщённое распределение Пуассона для выборок, содержащих нулевые значения. В последующих работах была предложена стохастическая модель экстремумов стока в виде смеси двух распределений: усечённого в медиане нормального закона и закона распределения Парето (Болгов и др., 1998). Рекомендованная модель хорошо воспроизводила основные черты гистограммы распределения паводочных расходов воды, однако большое число параметров приводило к вычислительной неустойчивости задачи оценивания этих параметров. К тому же в ряде случаев эта модель приводила к очень большим значениям стока в зоне малых обеспеченностей. В последние годы обсуждается применение в гидрологических расчётов лог-пирсоновского распределения вероятностей, широко используемого в инженерной практике США [30].

Одним из эффективных подходов к решению задачи аппроксимации распределений является применение теории усечённых выборок. Гидрологические аспекты усечения распределения С. Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля достаточно подробно обсуждались в работах ИВП [6, 7, 8]. Рассмотрим в качестве примера усечение распределения Крицкого-Менкеля. Если существует плотность вероятности случайной величины  $\xi$ , которую обозначим через  $f(\xi)=F'(\xi)$ , где

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(\xi) d\xi, \quad (10)$$

то плотность усечённого в точке  $k$  распределения случайной величины  $\xi$  определяется по формуле:

$$f_k(x) = \frac{f(x)}{1 - F(k)} = \frac{f(x)}{q} = cf(x), \quad (11)$$

где  $c=1/q$ ,  $q$  – вероятность события  $\xi \geq k$ , т.е. вероятность превышения (обеспеченность).

Пусть  $F(x)$  – функция, а  $f(x)$  – плотность трёхпараметрического гамма-распределения, т.е.

$$f(x) = \left[ \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{\gamma/b} \frac{1}{\Gamma(\gamma|b|x_0)} \left( \frac{x}{x_0} \right)^{\gamma/b-1} \exp \left[ -\frac{x}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b}, \quad (12)$$

где  $x_0$ ,  $\gamma$  и  $b$  – параметры.

Найдём параметры усечённого распределения, выразив их через параметры исходного распределения.

Согласно (10) и (11) плотность  $f_k(x)$  усечённого в точке  $k$  трёхпараметрического гамма-распределения имеет вид:

$$f_k(x) = \frac{1}{1-F[k]} \left[ \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b} \frac{1}{\Gamma(\gamma|b|x_0)} \left( \frac{x}{x_0} \right)^{\gamma/b-1} \exp \left[ -\frac{x}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b} \quad (13)$$

Начальный момент  $m_1$  первого порядка равен

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{1}{q} \int_{\kappa}^{\infty} x f_k(x) dx = c \int_{\kappa}^{\infty} x \left[ \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b} \times \\ &\times \frac{1}{\Gamma(\gamma|b|x_0)} \left( \frac{x}{x_0} \right)^{\gamma/b-1} \exp \left[ -\frac{x}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b} dx \end{aligned} \quad (14)$$

Сделав замену переменной  $z = \left[ -\frac{x}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b}$  и введя обозначение,  $a = \frac{x_0 \Gamma(\gamma)}{\Gamma(\gamma+b)}$ , получим после некоторых преобразований

$$m_1 = c \int_z^{\infty} az^b \frac{z^{\gamma-1}}{\Gamma(\gamma)} e^{-z} dz = ac \frac{\Gamma(b+\gamma)}{\Gamma(\gamma)} [1 - \Gamma(z_1 b + \gamma)], \quad (15)$$

где

$$z_1 = \left[ -\frac{\kappa}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b}, \quad \Gamma(\alpha, \beta) = \int_0^{\alpha} e^{-t} t^{\beta-1} dt. \quad (16)$$

Начальный момент  $\kappa$ -го порядка

$$\begin{aligned} m_{\kappa} &= c \int_{\kappa}^{\infty} x^{\kappa} f_k(x) dx = ca^{\kappa} \int_z^{\infty} z^{\kappa b} \frac{z^{\gamma-1}}{\Gamma(\gamma)} e^{-z} dz = \\ &= ca^{\kappa} \frac{\Gamma(\kappa b + \gamma)}{\Gamma(\gamma)} [1 - \Gamma(z_{\kappa} b + \gamma)]. \end{aligned} \quad (17)$$

По формулам, связывающим начальные и центральные моменты, получим дисперсию и асимметрию усечённой величины.

### Двустороннее усечение трёхпараметрического гамма-распределения

Если случайная величина  $\xi$  подчиняется трёхпараметрическому гамма-распределению, то плотность распределения величины  $\eta$ , получаемой из  $\xi$  усечением в точках  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ , имеет вид

$$f_{\kappa_1 \kappa_2} = \frac{f(\xi)}{F(\kappa_2) - F(\kappa_1)} \quad (18)$$

в интервале  $[\kappa_1, \kappa_2]$  и равна нулю вне этого интервала. Выразим параметры усечённого распределения через параметры исходной

плотности (13). Первый начальный момент (или математическое ожидание) усечённой случайной величины равен

$$m_1 = A(\kappa_1, \kappa_2) \int_{\kappa_1}^{\kappa_2} x f(x) dx, \quad (19)$$

где  $A(\kappa_1, \kappa_2) = [F(\kappa_2) - F(\kappa_1)]^{-1}$ .

Выполнив замену переменной, получим усечённое гамма-распределение для случайной величины  $\eta$  с плотностью распределения  $f_{\kappa_1, \kappa_2}(z)$  в пределах от  $z_1$  до  $z_2$ :

$$f_{\kappa_1, \kappa_2}(z) = \frac{A(z_1, z_2)}{\Gamma(z)} z^{\gamma-1} e^{-z}, \quad (20)$$

где

$$z_\kappa = \left[ -\frac{\kappa}{x_0} \frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{1/b}, \quad \kappa = 1, 2,$$

выражение для начального момента  $\kappa$ -го порядка получаем в следующем виде:

$$m_\kappa = A(z_1, z_2) a^\kappa \frac{\Gamma(\gamma+\kappa b)}{\Gamma(\gamma)} [\Gamma(z_2, \gamma+\kappa b) - \Gamma(z_1, \gamma+\kappa b)],$$

где  $a = \frac{x_0 \Gamma(\gamma)}{\Gamma(\gamma+b)}$ , а в квадратных скобках записана разница неполных гамма-функций соответствующих аргументов.

### Теория экстремальных событий для аппроксимации распределений

В работах ИВП применительно к максимальным расходам воды были исследованы два распределения, появившиеся сравнительно недавно в результате обобщения теории экстремальных статистик: обобщённое распределение Парето (GPD) и обобщённое распределение экстремумов (GEV) [31] и др. Класс всех функций  $F(x)$ , для которых предельное распределение нормированного максимума при некотором выборе констант имеет одну и ту же функцию распределения  $H(x)$ , называют **областью притяжения** этой  $H(x)$ . Доказано, что функции распределения  $H(x)$ , определяющие все возможные области притяжения, можно описать (с точностью до параметра сдвига и масштабного параметра) однопараметрическим семейством:

$$H_\xi(x) = \begin{cases} \exp(-(1+\xi x)^{-1/\xi}), & -\infty < \xi < +\infty, \xi \neq 0, 1+\xi x > 0; \\ \exp(-\exp(-x)), & \xi = 0, -\infty < x < +\infty. \end{cases} \quad (21)$$

Распределение (1.6.2) называется **стандартным обобщённым распределением экстремальных значений**. Параметр  $\xi$  называют **параметром формы распределения**. При  $\xi>0$  выражение (1.6.2) даёт распределение Фреше (его плотность убывает как степень  $(1+1/\xi)$ ); при  $\xi=0$  (2) совпадает с двойным экспоненциальным законом (распределением Гумбеля), а при  $\xi<0$  (1.6.2) даёт распределение Вейбулла, ограниченное справа значением  $-1/\xi$ . Необходимые и достаточные условия, обеспечивающие принадлежность функции  $F(x)$  к области притяжения распределения (21) с тем или иным значением параметра формы  $\xi$  можно найти в [32].

GPD возникает в задаче определения предельного распределения больших значений, превышающих некоторый порог  $s$ . Поскольку как GEV, так и GPD зависят по существу лишь от поведения функции распределения  $F(x)$  при больших значениях аргумента, эти два распределения оказываются тесно связанными:

$$G(x|\xi, s)=1+\ln(H_\xi(x/s))=1-(1+\xi x/s)^{-1/\xi},$$

где  $G(x|\xi, s)$  обозначает GPD без параметра сдвига.

Параметр формы  $\xi$ , как мы видим, представляет наибольший интерес при анализе экстремальных значений. Отметим, что для положительных  $\xi$  хвост распределения GPD убывает степенным образом как  $1/x^{1/\xi}$ .

Основные результаты попыток применения теории экстремальных статистик к рядам максимальных расходов воды рек дождевого питания можно сформулировать в следующем виде.

1. Для рассматриваемого класса природных процессов не всегда возможно предложить модель распределения максимальных расходов воды, одинаково хорошо воспроизводящую особенности гистограммы во всём диапазоне изменения аргумента.

2. Приложение теории экстремальных статистик в гидрологии предполагает выяснение характера поведения гистограммы в её хвостовой части и указание диапазона применения той или иной модели распределения. Используемая в данной статье основная идея заключается в том, что из рассматриваемой теоретической схемы следует вывод о предпочтении так называемого GPD-распределения для «хвостов» распределений экстремумов. Очевидно, что GPD модель действует, начиная лишь с некоторого порогового значения, и поэтому необходимо решать весьма сложную задачу поис-

ка оптимального значения этого порога (точки усечения, как принято называть её в гидрологической литературе).

Важнейший аспект статистического анализа – технология индивидуального оценивания. Для «тяжёлохвостовых» распределений обычные моменты могут не существовать (в данной задаче уже начиная со второго порядка) и поэтому рекомендуются либо оценки наибольшего правдоподобия, либо оценки по методу L-моментов, использующему соотношения между параметрами распределений и порядковыми статистиками, оцениваемыми по выборке.

### Оценивание параметров распределений методом L-моментов

Рассмотрим основные положения метода L-моментов, опираясь на результаты [17]. Пусть случайная величина  $X$  имеет функцию распределения  $F(x)$  и функцию квантилей  $x(F)$ , обратную по отношению к  $F(x)$ . Расположим ряд из  $n$  из наблюдений значений в возрастающем порядке  $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq x_{3:n}, \dots, \leq x_{n:n}$ .

L-моменты порядка  $r$  определяются соотношением

$$\lambda_r = r^{-1} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} E x_{r-k:r}, \quad r=1, 2, \dots, \quad (22)$$

где  $E$  – математическое ожидание. Математическое ожидание порядковой статистики может быть представлено в виде:

$$E x_{j:r} = \frac{r!}{(j-1)! (r-j)!} \int_0^1 x(F) [F(x)]^{j-1} [1-F(x)]^{r-j} dF(x). \quad (23)$$

Первые несколько L-моментов могут быть представлены в виде

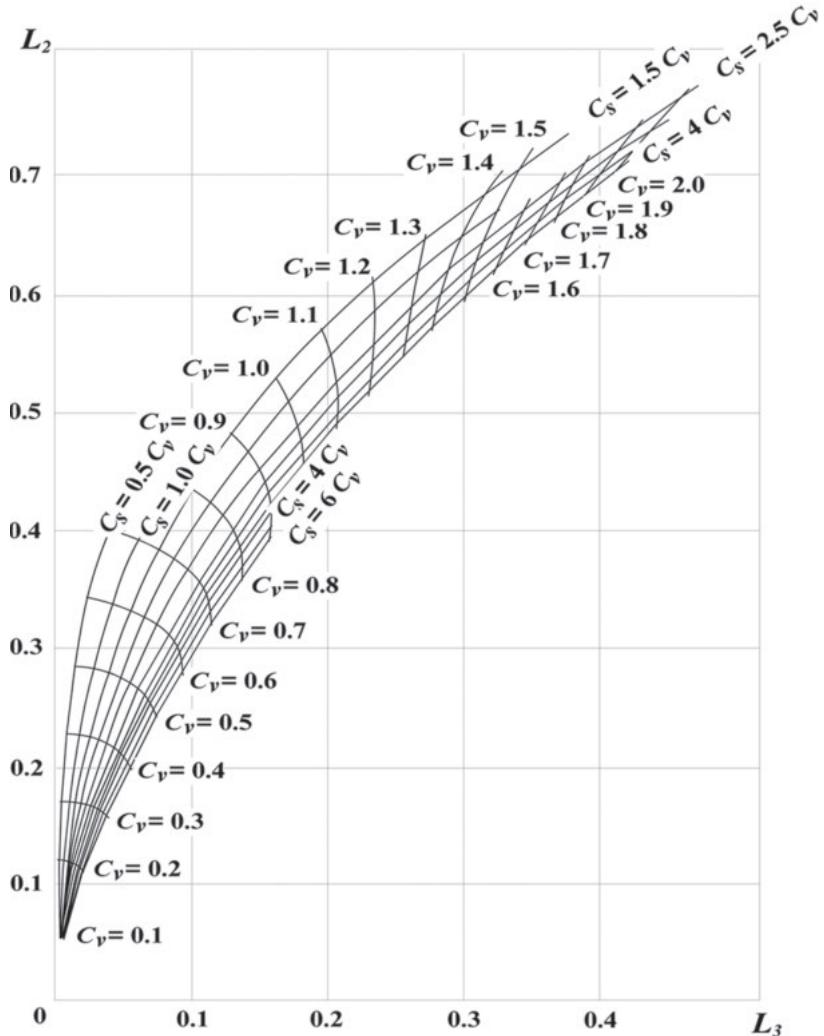
$$\begin{aligned} \lambda_1 &= EX = \int_0^1 x(F) dF, \quad \lambda_2 = \frac{1}{2} E(X_{2:2} - X_{1:2}) = \int_0^1 x(F)(2F-1) dF, \\ \lambda_3 &= \frac{1}{3} E(X_{3:3} - X_{2:3} - X_{1:3}) = \int_0^1 x(F)(6F^2 - 6F + 1) dF, \\ \lambda_4 &= \frac{1}{4} E(X_{4:4} - 3X_{3:4} + X_{2:4} - X_{1:4}) = \int_0^1 x(F)(20F^3 - 30F^2 + 12F + 1) dF. \end{aligned} \quad (24)$$

Выборочные оценки L-моментов могут быть найдены с помощью следующих соотношений:

$$l_1 = n^{-1} \sum_i x_i, \quad l_2 = \frac{1}{2} \binom{n}{2}^{-1} \sum_{i>j} (x_{i:n} - x_{j:n}), \quad (25)$$

$$l_3 = \frac{1}{3} \binom{n}{3}^{-1} \sum_{i>j>k} (x_{in} - 2x_{jn} + x_{kn}), \quad (25)$$

$$l_4 = \frac{1}{4} \binom{n}{4}^{-1} \sum_{i>j>k>l} (x_{in} - 3x_{jn} + 3x_{kn} - x_{ln}).$$



Номограммы для определения параметров трёхпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля методом L-моментов.  $L_2$  и  $L_3$  – выборочные оценки второго и третьего L-моментов

Для ряда законов распределения, наиболее часто употребляемых на практике, в [17] приводятся соотношения между параметрами этих распределений и L-моментами. Таким образом, оценив по выборке порядковые статистики  $\lambda_k$ , можно найти соответствующие оценки искомых параметров. Поскольку оценки методом L-моментов основаны на порядковых статистиках, они обладают «робастностью» по сравнению с оценками, основанными на обычных моментах.

С целью упрощения использования метода L-моментов в практических расчётах построена номограмма для определения параметров распределения  $(C_v, C_s/C_v)$  трёхпараметрического гамма распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (рис.). Для её построения было произведено численное интегрирование выражений  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  (24) при заданных  $C_s$  и  $C_v$  с помощью таблиц ординат С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля.

### **Марковские процессы в задаче прогнозирования уровня внутреннего водоёма**

Одной из наиболее сложных гидрологических задач является моделирование и прогнозирование уровня замкнутого водоёма. Являясь интегральной характеристикой, уровень бессточного водоёма весьма чувствителен к поведению процессов, определяющих приходные и расходные компоненты водного баланса на длительных временных интервалах.

Дифференциальное уравнение водного баланса Каспийского моря, при некоторых практически приемлемых предположениях имеет вид [33]:

$$dh/dt = -\alpha h(t) + g(t), \quad (26)$$

где  $h$  – уровень моря, отсчитываемый относительно некоторой нулевой отметки;  $\alpha$  – параметр инерционности, зависящий от крутизны берегов и  $g$  – результирующая процессов притока и испарения с поверхности моря за вычетом осадков на ее поверхность. Предполагается также, что  $g$  – стационарный марковский процесс с известным коэффициентом автокорреляции и дисперсией, а отток в залив Кара-Богаз-Гол учитывается путём корректировки математического ожидания притока.

Решение уравнения (26) возможно двумя путями. Это так называемый ланжевеновский подход, подробно рассмотренный в [33] и развитый в последние годы в ряде работ А.В. Фролова [34, 35]. Заметим,

что на практике широкое распространение получили численные (имитационные) методы решения уравнения (26), позволяющие учитывать разнообразные нелинейные зависимости, такие как вид зависимости площади зеркала от уровня моря, зависимость испарения от уровня моря, взаимную корреляцию притока и испарения, нелинейную зависимость оттока в КБГ от уровня и т.п. [36].

При реализации Ланжевеновского подхода сложно получить вид условного распределения, поскольку соответствующие уравнения записываются для параметров (моментов) распределения.

Если же мы рассмотрим исходное уравнение (26) как стохастическое, то из вида его коэффициентов уже можно делать вывод о характере распределения уровня моря. Линейный вид первого слагаемого и константа (единица) перед побуждающим процессом позволяют сделать вывод о гауссовойности искомого распределения. Остаётся вычислить оценки параметров условных плотностей.

Теория СДУ предполагает, что в правой части (26) имеется белый шум, корреляционной функцией которого является  $\delta$ -функция. Известно, что автокорреляция речного притока существенно сказывается на дисперсии колебания уровня моря, поэтому её игнорирование невозможно (сильно огрубляет решение). Для учёта эффекта, связанного с автокорреляцией, вводится фиктивный белый шум, интенсивность которого увеличивается и вычисляется по формуле [37].

$$N_0 - 4 \int_{-\infty}^{\infty} k_g(\tau) d\tau, \quad (27)$$

где  $k_g$  – ковариационная функция побуждающего процесса  $g$ .

Располагая интенсивностью  $N_0$  и коэффициентами уравнения (26), рассматриваемого как стохастическое дифференциальное уравнение, получим численное решение задачи вероятностного прогноза уровня моря.

Непредсказуемый характер поведения уровня Каспийского моря стимулировал исследователей на поиск более сложных моделей, объясняющих экстремальные перепады уровня моря. Основные гипотезы опирались на возможный нелинейный характер зависимости испарения с водной поверхности Каспия от его уровня, нелинейную зависимость площади зеркала от его уровня. Можно отметить работы В.И. Найдёнова и И.А. Кожевниковой [39]. Основываясь на представлении о наличии «потенциальных ям» [40], авторы

получили бимодальное распределение уровня Каспийского моря. Результаты иных расчётов показали, что учёт нелинейного характера морфометрии чаши уровня, выявленного с помощью цифровой модели рельефа, на распределение уровня моря существенного влияния не оказывает [41]. Введение же в уравнение баланса моря зависимости испарения с водной поверхности от его уровня приводит к неправдоподобно большим отклонениям уровня от нормы на обозримую перспективу.

Основной вывод заключается в том, что существенно уменьшить доверительный интервал долгосрочного прогноза уровня моря в современных условиях не представляется возможным. Описанные выше методы применялись в ИВП и к другим водоёмам, характеризующимся слабо предсказуемыми многолетними колебаниями уровня воды (трансграничное озеро Ханка, «пульсирующее» озеро Чаны, озеро Далай-Нор в КНР и др.).

#### **Байесовские решения для оценки вероятностных характеристик стока в нестационарных условиях**

Данные мониторинга свидетельствуют о том, что на территории РФ имеют место существенные изменения стока, в основном во внутритгодовом разрезе. Наблюдается заметное увеличение стока зимней межени и уменьшение стока весеннего половодья, т.е. происходит перераспределение стока внутри года, что, с одной стороны, облегчает решение водохозяйственных задач, а с другой – требует развития методов обработки нестационарных последовательностей речного стока.

Следует отметить, что имеющиеся гидрологические ряды слишком коротки для построения сложных вероятностных моделей только статистическими методами. Построить матрицу вероятностей перехода из одного устойчивого состояния, длящегося несколько десятков лет, в другое, наблюдавшееся также в течение десятилетий, невозможно, поскольку мы имеем дело только с одним случаем смены состояния. Таких случаев должно быть несколько десятков и только тогда можно говорить и о распределении вероятностей времени пребывания системы в одном из состояний, и об оценке матрицы переходных вероятностей. Как правило, мы располагаем двумя-тремя состояниями, что вынуждает применять на практике простейшие гипотезы, к обсуждению которых мы вернемся ниже.

Обратимся к проблеме учёта нескольких условно стационарных состояний при прогнозировании стоковой характеристики на период эксплуатации проектируемого объекта. Здесь в первую очередь надо обсудить характер стохастической модели, позволяющей воспроизводить моменты смены состояний процесса.

В прикладных разделах теории случайных процессов известны стохастические модели с несколькими устойчивыми состояниями, но в случае многолетних колебаний стоковых характеристик такие модели вряд ли могут быть применены. Физически обоснованных гипотез, подтверждающих наличие таких устойчивых состояний, в современной гидрологии пока ещё не предложено.

В нашем случае имеется только два состояния процесса и мы можем лишь предположить, что с вероятностями и  $n_1/N$  и  $n_2/N$  система может находиться в одном из них. Здесь  $n_1+n_2=N$ , где  $N$  – общая продолжительность неоднородной выборки.

Относительно будущих колебаний стока мы можем только утверждать, что с соответствующими вероятностями система может находиться в одном из двух состояний. В таком случае можно предположить, что математическое ожидание прогнозируемого процесса является смесью двух распределений [42], [43]:

$$\tilde{p}(\theta/x) = \frac{n_1}{N} \cdot \eta(\theta, n_1) + \frac{n_2}{N} p(\theta/x), \quad (28)$$

где  $\eta(\theta, n_1)$  – выборочное распределение среднего (математического ожидания) для первого условно стационарного участка длиной  $n_1$ , а  $p(\theta/x)$  – апостериорная плотность байесовской оценки  $\theta$  для новых климатических условий. Нетрудно заметить, что плотность (28) является двухмодальной, поскольку выборочная плотность математического ожидания является гауссовой, а апостериорная плотность  $p(\theta/x)$  при малой дисперсии также близка к нормальному закону.

Окончательный этап байесовского оценивания (прогнозирования) состоит в вычислении прогнозной плотности по формуле полной вероятности. В этом случае смесь распределений (28) будет выступать в качестве апостериорного распределения, а модельным распределением будет двухпараметрическое гамма-распределение с параметром  $\gamma$ , равным среднему значению для обеих выборок:

$$\pi(y) = \int_{\theta} P(y, \gamma, \theta) \cdot \tilde{p}(\theta/x) d\theta. \quad (29)$$

Полученная прогнозная плотность распределения  $\pi(y)$  уже не будет являться гамма-распределением и вычисляется путём численного интегрирования уравнения (29).

В будущем, если система перейдет в третье состояние, отличающееся от двух предыдущих, процедуру можно повторить ещё раз, записав уравнение (28) для трёх компонентов.

Понятно, что прогнозная плотность (29), не является полным заданием случайного процесса, поскольку представляет собой лишь одномерный закон распределения и может быть использована только для назначения расчётных значений параметров (квантилей) с учётом возможного нестационарного поведения процесса.

### Заключение

За 50 лет существования ИВП РАН в работах его сотрудников получили существенное развитие методы стохастической гидрологии и получены важнейшие результаты, которые вместе с достижениями других научных школ (ГГИ, МГУ, РГГМУ) позволили создать современный арсенал гидрологии, обеспечить решение крупных водохозяйственных задач.

Существенные результаты были получены в задачах описания многолетних колебаний стока, в теории экстремальных гидрологических событий, в теории колебания уровней замкнутых водоёмов, в задаче оценивания параметров стохастических моделей стока. На основе полученных результатов создавались и корректировались нормативные документы, определяющие методы решения широкого круга прикладных задач. Но возникли и новые задачи, в основном связанные с последствиями климатических изменений для гидрологических систем. Актуальной и слабо исследованной является проблема вероятностного прогнозирования стока для новых нестационарных условий. Соответственно возникает задача и регулирования стока в нестационарных условиях его колебаний. Эти и многие другие задачи составят предмет гидрологических исследований в ИВП РАН в обозримом будущем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сарманов О.В. Собственные корреляционные функции и их применения в теории стационарных марковских процессов. // Доклады АН СССР. Т. 132, №4, 1960. С. 769–772.

2. Сарманов О.В. Исследование стационарных марковских процессов методом разложения по собственным функциям // Тр. МИАН. 1961. С. 239–261.
3. Сарманов О.В.. Сарманов И.О. Основные типы корреляции, применяемые в гидрологии //М.: Наука, 1983. 200 с.
4. Сарманов И.О. Процесс гамма-корреляции и его свойства //Доклады Академии Наук СССР. Т. 191, №1, 1970. С. 30–32.
5. Привальский В.Е., Панченко В.А., Асарина Е.Ю. Модели временных рядов с приложениями к гидрометеорологии// Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. 226 с.
6. Блохинов Е.Г. Распределение вероятностей величин речного стока // М.: Наука, 1974. 169 с.
7. Сотникова Л.Ф. Опыт применения усечённого гамма-распределения к расчёту максимального стока рек // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. М.: Наука, 1973. С. 56–86.
8. Болгов М.В., Сарманов И.О. Усечённое трёхпараметрическое гамма-распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля и некоторые его приложения к гидрологическим расчётам. // Водные ресурсы. №2, 1988.
9. Сванидзе Г.Г. Моделирование теоретического гидрологического ряда методом Монте-Карло // Сообщ. АН Груз. ССР. Т. 26, №5, 1961. С. 565–572.
10. Резниковский А.Ш., Александровский А.Ю., Атурин В.В. и др. // Гидрологические основы гидроэнергетики. М.: Энергия, 1979. 232 с.
11. Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 270 с.
12. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 256 с.
13. Раткович Д.Я. Моделирование взаимозависимых гидрологических рядов (на примерах притока к Аральскому и Азовскому морям) // Водные ресурсы. №1, 1977. С. 5–15.
14. Музылёв С.В., Фролов А.В. О статистическом моделировании многомерных гидрологических процессов // Водные ресурсы. №3, 1978. С. 14–21.
15. Болгов М.В. Моделирование многомерных гидрологических характеристик методом разложения по естественным ортогональным функциям.// Метеорология и гидрология. №7, 1994.
16. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. М.: Наука, 1981. 255 с.
17. Hosking J.R.M. L-momenys: Analysis and estimation of distribution using linear combination of order statistics // J. Roy. Statist. V. 52, №1, 1990. P. 105–112.
18. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. О методике совместного анализа наблюдений за стоком гидрологически сходных бассейнов // Тр. ГГИ. Вып. 180, 1970. С. 3–29.
19. Блохинов Е.Г., Сарманов О.В. Гамма-корреляция и её использование при расчётах многолетнего регулирования речного стока. // Тр. ГГИ. Вып. 14. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. С. 52–75.

20. Сарманов И.О. Построение корреляции между равномерно распределёнными случайными величинами // Тр. ГГИ. Вып. 160, 1968. С. 81–89.
21. Сарманов И.О. О корреляции между функциями зависимых случайных величин, имеющих гидрологическое приложение // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. М.: Наука, 1973. С. 87–103.
22. Klemes V., Boruvka L. Simulation of Gamma-distributed First-order Markov Chain // Water Resources Research. V. 10, №1, 1974. P. 87–91.
23. Картвелишвили Н.А. Стохастическая гидрология. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 162 с.
24. Болгов М.В. Лобода Н.С., Николаевич Н.Н. Пространственное обобщение параметров внутрирядной связности рядов годового стока // Метеорология и гидрология. №7, 1993.
25. Болгов М.В. Нестационарная стохастическая авторегрессионная модель гидрологических процессов с сезонным ходом // Водные ресурсы. 23(1), 1996.
26. Рождественский А.В., Ежов А.В., Сахарюк А.В. Оценка точности гидрологических расчётов. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 279 стр.
27. Найдёнов В.И., Кожевникова И.А. Почему так часто происходят наводнения? // Природа. №9, 2003.
28. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1968.
29. Болгов М.В., Писаренко В.Ф. О распределении максимальных расходов воды рек Приморья // Водные ресурсы. 26(6), 1999. С. 710–721.
30. Болгов М.В., Сарманов И.О. Логгаммовое распределение вероятностей и его приложения в гидрологических расчётах // Водные ресурсы. 23, №2, 1996.
31. Embrechts P., Kluppelberg C., Mokosh T. Modeling Extreme Events. Berlin: Springer, 1977. 645 p.
32. Bobbee B., Ashkar F. The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology. Toronto: Water Res. Public. 1991. 203 p.
33. Музылёв С.В., Привальский В.Н., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 174 с.
34. Фролов А.В. Влияние автокоррелированности речного притока и видимого испарения на уровеньный режим озера // Метеорология и гидрология. №4, 1989. С. 94–101.
35. Фролов А.В. Влияние возобновления оттока в Кара-Богаз-Гол на многолетние колебания уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. №7, 1988. С. 87–97.
36. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. №6, 1994.
37. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Советское радио, 1977. 488 с.

38. Найдёнов В.П., Подсечин В.П. О нелинейном механизме колебаний уровня водоемов // Водные ресурсы. №6, 1992. С. 5–11
39. Найдёнов В.И., Кожевникова И.А. Предсказуем ли уровень моря? // Природа. №5, 1994. С. 4–11
40. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках. М.: Мир, 1986. 526 с.
41. Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море. Экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 380 с.
42. Болгов М.В., Сенцова Н.И. Байесовские оценки расчётных характеристик минимального стока рек в нестационарных условиях // Метеорология и гидрология. №11, 2010. С. 70–80
43. Болгов М. В., Коробкина Е. А., Филиппова И. А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. №7, 2016. С. 72–81.

**Моделирование многолетних колебаний  
уровней естественных озёр:  
основные исследования ИВП РАН за 1967–2017 гг.**

А.В. Фролов

**Введение**

Многолетние колебания уровней крупных естественных водоёмов представляют собой традиционный предмет исследований специалистов Института водных проблем. Изучению различных аспектов уровенного режима Каспийского моря, Байкала и других водоёмов уделялось и уделяется самое пристальное внимание. Естественные озёра являются замыкающими элементами речных систем, интегрирующими природные и техногенные воздействия на водные балансы и уровенный режим этих водоёмов. Экономическая активность человека в бассейнах озёр, с одной стороны, влияет на гидрологический режим озёр, с другой стороны, существует и обратное влияние, особенно в прибрежной зоне. Исследованиям уровенного режима озёр, выполненных и выполняемых в ИВП, свойственно сочетание научно-фундаментальной и прикладной направленности.

Среди озёр выделяются бессточные и проточные, в зависимости от отсутствия или наличия стока из водоёма. Иногда одно и то же озеро, в одно время, могло быть проточным, в другое время – бессточным, как, например, озеро Иссык-Куль и Каспийское море. Для многих бессточных озёр, расположенных в различных странах, общей и, возможно, главной, проблемой является угроза истощения водных запасов. В исследованиях российских (советских) специалистов особое внимание уделялось и уделяется самому большому внутреннему водоёму в мире – Каспийскому морю, учитывая его значение в социально-экономической активности в бассейне Каспия. Широкомасштабные планы развития орошения земель в бассейне Волги могли вызвать значительное снижение уровня Каспия. Насколько реальной была эта угроза – можно судить по судьбе Аральского моря, практически исчезнувшего вследствие разбора притока в море на орошение. Аналогичная угроза существует в наше время, например, для озера Урумие (Исламская Республика Иран). Для Каспия природа оказалась милостивой – и уровень моря

поднялся до современных отметок даже и без реализации сомнительного проекта переброски части стока северных рек.

Проблема отрицательного техногенного воздействия на водный баланс и, как следствие, на режим колебаний уровня существует и для проточных озёр. Спрос на воду растёт непрерывно, и в настоящее время под угрозой оказался уровеньный режим Байкала и сток р. Ангары. Помимо негативного влияния непосредственных изъятий из речного притока в озера, изменения климата также могут привести к неблагоприятным изменениям в колебаниях уровней естественных водоёмов. Для решения возникающих проблем, связанных с уровенным режимом озёр, необходимо, в первую очередь, понимать механизм и закономерности колебаний уровней водоёмов. Моделирование многолетних колебаний уровней озёр представляется необходимой составляющей исследований гидрологического режима естественных водоёмов.

Написать подробный обзор всех работ по исследованиям уровнянного режима озёр, выполненных в ИВП за полвека, учитывая ограниченный объём данной статьи, не представляется возможным. Здесь делается попытка представить наиболее значимые результаты в моделировании многолетних колебаний уровней озёр, полученные специалистами Института.

### **Основные виды моделирования многолетних колебаний уровней естественных озёр**

В исследованиях многолетних колебаний гидрологических процессов применяются модели различных видов, допускающих различную классификацию в соответствии с их характерными особенностями. Можно выделить (с некоторой долей условности) два вида моделей – динамико-стохастические и чисто статистические.

Первый вид моделей – динамико-стохастические, учитывающие стохастическую природу моделируемого процесса и динамическую составляющую, формируемую соответствующим физическим механизмом. В Институте водных проблем приоритет был отдан именно этому виду моделей. Многолетние колебания уровней естественных водоёмов рассматриваются как выходной процесс динамической системы, на вход которой поступают стохастические входные процессы – основные составляющие водного баланса водоёма, реч-

ной приток, осадки и испарение. Динамика этой системы описывается уравнением водного баланса озера.

Несомненным достоинством динамико-стохастических моделей является их физическая обоснованность. При достаточно надежном задании входных процессов и «внутренних» параметров моделируемой системы обычно это обстоятельство даёт достаточные основания считать смоделированный процесс адекватным реальному. В некоторых случаях оценка статистических характеристик колебаний уровня по смоделированному ряду может оказаться более надёжной, нежели при использовании ряда наблюдений. Например, колебания уровней бессточных озёр, обладают высоким коэффициентом автокорреляции, иногда превышающим 0,9. В сочетании с относительно небольшой длительностью наблюдений (обычно не более 100–150 лет), это приводит к тому, что ряды уровней оказываются эквивалентными всего нескольким независимым величинам, что не позволяет получить достаточно надежных статистических характеристик уровня, необходимых для построения модели. Основные составляющие водного баланса озёр – речной приток, осадки, испарение – имеют существенно меньшую автокоррелированность, что позволяет получить более достоверные статистические характеристики этих процессов. При условии достаточно точного описания колебаний уровня озера уравнением водного баланса, надёжность оценок статистических характеристик колебаний уровня оказывается приемлемой, в отличие от прямых оценок по рядам наблюдений.

Другая причина для предпочтения динамико-стохастических моделирования колебаний уровней озёр перед чисто стохастическим моделированием – возможность получать оценку реакции уровней озёр на изменения составляющих водного баланса озёр. Такие изменения могут быть вызваны, в частности влиянием климата и прямым техногенным воздействием на водный баланс озёр – например, изъятиями из речного притока, изменением морфометрических характеристик озёр и прочими подобными причинами.

Ко второму виду относятся модели типа «чёрного ящика», т.е. устанавливающие структуру модели исключительно на основании статистических свойств моделируемого процесса, без явного учёта физического механизма, формирующего моделируемый процесс.

Такого рода модели колебаний уровней естественных озёр получили меньшее применение по сравнению с динамико-стохастическими, однако также рассматривались в работах специалистов ИВП.

### **Бессточные озёра**

Впервые динамико-стохастическое моделирование было применено для описания колебаний уровня Каспийского моря как бессточного озера в конце 1930-х гг. С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем. Результаты их работы были доложены на Первом совещании по регулированию стока в 1940 г., организованного АН СССР. Публикация статьи [1] состоялась только после окончания Великой Отечественной войны, в 1946 г. В дальнейшем авторы неоднократно дополняли и развивали ранее разработанный подход [2–4]. Модель Крицкого и Менкеля описывала многолетние колебания приращений объёма воды в море, характеристики же уровня находились по зависимости между объёмом воды и уровнем воды в море. Основные положения, принятые авторами при моделировании, были следующие. В механизме формирования колебаний уровня моря выделялись два фактора: «активный», т.е. причина колебаний – изменчивость притока воды и испарения с акватории, и «реактивный», ограничивающий размах колебаний уровня, вследствие изменения объёма испарения – увеличения при отклонении уровня в большую сторону от равновесной отметки и уменьшения при снижении уровня. Под испарением, если не оговорено другое, в данном обзоре понимается разность между слоями испарения и осадков, называемая иногда «видимым», или «эффективным» испарением. На современном языке, активный фактор – это входной процесс системы «суммарный приток–озеро–уровень воды», реактивный фактор – суть отрицательная обратная связь в механизме колебаний уровня, образованная переменностью площади поверхности водоёма. Конечной целью моделирования было получение условных и безусловных статистических характеристик колебаний уровня водоёма. Оценки вероятностей отметок уровня находились в соответствии с принятым предположением о виде функции распределения вероятностей уровня. Крицкий и Менкель [1–4] предполагали, что годовые приращения наполнений Каспия и собственно колебания наполнений моря приближенно описываются распределением Гаусса – на основании того, отклонения уровня (соответственно,

наполнений) моря возможны как вверх, так и вниз от равновесного уровня. Отметим, что в работе [1] годовые объёмы притока в море и слоя испарения с морской акватории авторы также рассматривали как гауссова случайные величины, причем некоррелированные между собой. Позднее, в статье [2], это условие гауссности было несколько ослаблено, в том смысле, что гауссовым предполагались колебания «приведённых приращений», т.е. разности между объёмами притока и испарения с равновесной площади поверхности моря, без предположений о виде распределений притока и испарения по отдельности. Таким образом, Крицкий и Менкель при построении модели колебаний уровня Каспия использовали следующие предположения:

- о физическом механизме формирования колебаний уровня (наполнений), описываемым уравнением водного баланса водоёма;
- о функции распределения вероятностей входного процесса (разности между слоями притока в водоём и испарения);
- о временной структуре входного процесса – как последовательности независимых, или коррелированных последовательностей случайных величин;
- об отсутствии статистической связи между притоком в море и испарением;
- о зависимостях (линейных) между морфометрическими характеристиками водоёма – объёмами чаши, площади зеркала водоёма и уровня.

Разработанная Крицким и Менкелем модель колебаний уровня Каспия позволила получить основные статистические характеристики уровенного режима моря: уровень тяготения (т.е. устойчивый равновесный уровень), дисперсию и автокорреляционную функцию, взаимные корреляционные функции уровень–приращение уровня и уровень–«приведённые приращения наполнения» (т.е. разность между слоями притока в море и испарения). На основе этой модели Крицкий и Менкель рассчитывали вероятности отмечек уровня моря на перспективу нескольких десятилетий [1–4].

Практическая значимость модели Крицкого и Менкеля вполне проявилась также в возможности оценки на её основе влияния на режим колебания уровня моря техногенных воздействий. Аналити-

ческие зависимости между характеристиками уровня, с одной стороны, характеристиками притока и испарения и морфометрическими параметрами, с другой, позволяют оценить реакцию колебаний уровня моря на такие виды техногенных воздействий, как изменений режима притока в море и морфометрических характеристик вследствие отделения части испаряющей поверхности моря. Например, отсечение мелководий приводит к повышению уровня тяготения моря и к увеличению размаха (дисперсии) колебаний уровня [1–4].

Модель колебаний уровня бессточного водоёма, разработанная Крицким и Менкелем, имела математическую форму дискретного (разностного) стохастического уравнения. Ими было впервые показано, что последовательность наполнений (уровней) замкнутого водоёма образует простую цепь Маркова при условии, что «приведённые приращения наполнений» (т.е. разности между слоями притока и испарения) суть последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин. Если же «приведённые приращения» представляют собой простую цепь Маркова, то последовательность уровней в этом случае уже не будет марковской [2–4].

Для исследования уровенного режима Каспийского моря, в дополнение к модели Крицкого и Менкеля, Д.Я. Ратковичем [4, 5] применялся имитационный метод моделирования, суть которого состоит в численном решении разностного уравнения водного баланса моря. Входные процессы – приток и испарение – задавались в виде взаимно некоррелированных последовательностей, выходной процесс – значения уровня моря – образует соответствующий ряд величин. Длина рядов входных процессов и уровня выбирается достаточно большой, чтобы обеспечить необходимую точность оценок статистических характеристик уровня. Имитационный метод исходит из тех же основных положений, что и аналитический метод Крицкого и Менкеля, но не требует линеаризации уравнения водного баланса водоёма, что представляется определенным его достоинством.

Проблема экстраполяции колебаний уровня Каспия рассматривалась в работах В.Е. Привальского [6, 7, 8]. Для экстраполяции уровня моря он использовал как чисто статистическую модель коле-

баний уровня [6], так и модели, основанные на использовании уравнения водного баланса водоёма[7, 8]. Для экстраполяции колебаний уровня моря использовались три вида параметрических моделей – авторегрессионной, скользящего среднего и смешанной. Были также проведены расчёты имитационным методом и по дискретному стохастическому уравнению водного баланса моря. Привальским были подтверждены выводы Крицкого и Менкеля [2] и М.И. Будыко и М.И. Юдина [9] о допустимости приближённого описания колебаний уровня Каспия процессом авторегрессии первого порядка (марковским процессом) и результат Н.А. Багрова [10] о большем соответствии колебаний уровня Каспия процессу авторегрессии второго порядка. По мнению С.Г. Добровольского [11], приращения уровня Каспия удовлетворительно описываются чисто статистической моделью процесса авторегрессии первого порядка. Результаты некоторых экстраполяций уровня Каспия, выполненных Привальским в предположении роста безвозвратных изъятий из речного притока (до  $70 \text{ км}^3/\text{год}$ ) указывали на значительное снижение уровня моря, чего, как известно, не произошло. Однако это не означает, что несовпадение экстраполяции и реального уровня было вызвано несовершенством модели колебаний уровня. Более того, при использовании любой, более или менее адекватной модели, любой – линейной или нелинейной, огромные изъятия в обязательном порядке должны были привести к прогнозированию значительного падения уровня Каспия. Было бы очень странно, если бы это было не так. Более подробно многие аспекты проблемы прогнозирования уровня Каспия приводятся в монографиях Ратковича [12, 13].

Значительному развитию теоретико-вероятностного подхода к исследованиям бессточных озёр послужила фундаментальная работа С.В. Музылёва [14,15]. Базисом для этой работы послужили положения теоретико-вероятностного подхода, разработанного Крицким и Менкелем. Применение Музылёвым математического аппарата непрерывных случайных процессов позволило свести проблему моделирования колебаний уровня бессточного озера к классическим задачам неравновесной статистической механики и статистической радиотехники.

Музылёвым было получено решение дифференциального (непрерывного по времени) стохастического уравнения, моделиру-

ящего колебания уровня бессточного озера, в приближении марковского процесса, плотность вероятности которого удовлетворяет уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова. Для вывода этого уравнения потребовалось применение метода расщепления усреднённого произведение двух случайных процессов (формула Фуруцу–Новикова), что позволило получить строгое математическое доказательство правомерности описания колебаний уровня бессточного озера линейным стохастическим дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Музылёв вывел уравнения для моментов распределения уровня произвольного порядка и получил большой набор статистических характеристик уровня: средний уровень озера как функцию средних величин и дисперсий составляющих водного баланса озера – притока и испарения, условная (зависящее от начальных условий) и безусловная дисперсии уровня, автокорреляционные функции уровня и его приращений, взаимную корреляционную функцию уровня и его приращений, взаимную корреляционную функцию притока в озеро и уровня, спектры уровня и его приращений. Применение теории выбросов случайных процессов показало, что среднее время перехода уровня через отметку уровня тяготения равно примерно 30 годам. Близость функции распределения вероятностей уровня к нормальному распределению была объяснена эффектом нормализации процесса колебаний уровня как выхода линейной инерционной системы, у которой время корреляции входного процесса (разности между слоями притока и испарения) намного меньше времени корреляции уровня. Существенно, что Музылёвым были также получены статистические характеристики уровня для бессточного озера с притоком и испарением, имеющим симметричную (чётную) взаимно-корреляционную функцию [15]. Последний результат представляется практически важным, поскольку корреляции между притоком и испарением оказывает заметное влияние на размах колебаний уровня озера. По оценкам специалистов ГГИ, коэффициент взаимной корреляции между притоком и испарением для Каспия равен примерно  $-0,2 \dots -0,4$ , что увеличивает дисперсию колебаний уровня моря примерно на 20%.

Исследования Музылёва, опиравшиеся на теоретико-вероятностный подход Крицкого и Менкеля, означали значительный про-

гресс в изучение многолетних колебаний уровней бессточных озёр и послужили фундаментом для моделирования ряда других гидрологических процессов – многолетних колебаний уровней проточного озёр, многолетних колебаний речного стока, в том числе озёрного питания.

Повышенный интерес в конце 1980-х – начале 1990-х гг. к проблеме моделирования уровня Каспия был связан, во-первых, с критикой не оправдавшихся прогнозов уровня моря, составлявших звено в обосновании переброски части стока северных рек на южный склон ЕТС. Во-вторых, значительные ущербы в экономике прибрежных территорий, вызванные подъёмом уровня Каспия на 2 м 40 см в 1978–95 гг., привели к необходимости разработки проектов по защите побережья от наступления моря, опирающихся на оценки будущих колебаний уровня. Были предложены модели, в основе которых использовалось предположение о нелинейной зависимости площади зеркала моря от уровня как причины существовании нескольких равновесных уровней (см., например, [16]). Применительно к Каспию, гипотеза о нелинейной зависимости площади зеркала Каспия от уровня моря как о причине множественности равновесных уровней не получила подтверждения. Главным следствием критики существовавших моделей было стимулирование исследований в направлении поиска возможной положительной обратной связи колебаний в механизме колебаний уровня Каспия.

Именно это было сделано в исследованиях М.Г. Хубларяна и В.И. Найдёнова [17], предположивших формирование положительной обратной связи в механизме колебаний уровня моря вследствие тепловлагообменных процессов взаимодействия водной поверхности с атмосферой. Собственно, соображения о зависимости испарения от уровня Каспия высказывались достаточно давно: «... средняя по водёму [Каспию] в целом высота слоя видимого испарения [...] зависит, при прочих равных условиях, [...] от уровня моря» [4]. Более того, в качестве одной из задач дальнейших исследований авторами цитируемой монографии был прямо назван учёт «неравномерности испарения с различных частей акватории моря и зависимость интенсивности испарения от глубины, изменяющейся при колебаниях уровня» Каспия ([4], с. 131]). Хубларяном и Найдёновым

были получены первые содержательные результаты моделирования, учитывающие этот эффект.

Гипотеза о зависимости испарения с поверхности моря от глубины (уровня) моря оказалась перспективной, вполне поддающейся физическому обоснованию. Для Каспия, в определённых условиях, эта гипотеза становилась обоснованным положением. Несколько упрощённо – но физически справедливо – можно сказать, что в основе модели Хубларяна и Найдёнова лежит хорошо известный и неопровергимый факт: вода на мелководье больше прогревается по сравнению с глубоководной частью водоёма, соответственно, испарение с мелководья будет больше. Экспериментально зависимость испарения с поверхности Каспия от уровня установлена Г. Н. Паниным [18]: в тёплый период (апрель–август) испарение с мелководного Северного Каспия намного больше испарения со Среднего и Южного Каспия, причём в отдельные месяцы – в разы. Например, в мае слой испарения с Северного Каспия в 2–3 раза больше, чем соответствующая величина для Среднего и Южного Каспия: 100, 35 и 42 мм/месяц соответственно [18]. Такое различие в испарении по акватории моря вполне понятно, если учесть, что средняя глубина Северного Каспия – 4,4 м, Среднего Каспия – 192 и 345 м, соответственно (по отношению к отметке уровня -28,0 м БС), при этом Северный Каспий занимает примерно  $\frac{1}{4}$  площади всего моря. Такое сочетание мелководной и глубоководных частей Каспия уникально для крупных озёр.

Действие положительной обратной связи в механизме колебаний уровня бессточного Каспия, вызванной переменностью площади зеркала моря и зависимостью слоя испарения от глубины моря приводит к бимодальной функции распределения вероятностей уровня. Однако плотность распределения уровня Каспия становится одномодальной даже при небольших изменениях среднего притока в море от той его величины, при которой существует бимодальность. Анализ полученных в результате решения уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова плотностей распределения вероятностей уровня Каспия показал, что существование нескольких равновесных уровней моря («уровней тяготения») очень чувствительно к среднему притоку речной воды в море. Изменение среднемноголетнего притока даже на  $1\text{--}3 \text{ km}^3$  может привести, например, к

тому, что, вместо трёх равновесных уровней останется только один [19]. Однако отсутствие свойства робастности модели Хубларяна и Найдёнова не уменьшает значения полученного ими вывода о существовании положительной обратной связи в механизме колебаний уровня Каспия, поскольку эта связь оказывает влияние на плотность распределения уровня моря в любом случае – даже если эта плотность имеет одномодальный вид.

### Проточные озёра

Теоретико-вероятностный поход в изучении уровненного режима бессточного озера был естественным образом распространён на проточные озёра [20]. Такие озёра можно рассматривать как более общий тип озёр, нежели бессточные, поскольку в водном балансе добавляется сток из озера. Зависимость стока из озера от уровня воды в нём образует отрицательную обратную связь в механизме колебаний уровня водоёма. Для озёр, расположенных в зонах избыточного увлажнения, эта связь намного «сильнее», нежели отрицательная обратная связь, сформированная переменностью площади зеркала и испарением. Для проточных озёр, расположенных в зоне избыточного увлажнения, доля стока в расходной части водного баланса, примерно на порядок (в 10–13 раз) превышает расход воды на испарение. В таких случаях можно пренебречь изменчивостью площади и считать её постоянной.

Зависимость между годовыми объёмами стока из озера от уровня в реальном диапазоне колебаний уровня обычно хорошо аппроксимируется линейной функцией. [20].

Каспийское море, по причине одностороннего оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, также можно рассматривать как своеобразный проточный водоём. Однако, в отличие от проточных озёр зоны избыточного увлажнения, механизм колебаний уровня Каспия имеет особенности. Во-первых, отрицательные обратные связи – одна образованная переменностью площади зеркала (совместно с испарением), другая – зависимостью оттока в Кара-Богаз-Гол от уровня Каспия, имеют один порядок, хотя первая связь более выражена. Во-вторых, на колебания уровня в некотором диапазоне отметок положительная обратная связь, образованная нелинейной зависимостью испарения от уровня, оказывается более «сильной», нежели отрицательная, вызванная переменностью площади зерка-

ла моря. Как уже отмечалось, для бессточного Каспия, при отсечённом заливе Кара-Богаз-Гол и при некоторых величинах среднего притока, возможно существование бимодальной функции распределения вероятности [17].

Однако, как показали более детальные исследования, при проточном Каспии – т.е. при оттоке морской воды в залив Кара-Богаз-Гол – ситуация меняется. Отрицательная обратная связь, образуемая зависимостью оттока морской воды в залив, «подавляет» положительную обратную связь, вызванную нелинейной зависимостью объёма испарения от уровня Каспия. В результате, при свободном оттоке морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, функция распределения вероятностей уровня Каспия становится одномодальной [19,21]. Тем самым, было установлено, что проточность Каспия оказывает существенное влияние на вид плотности распределения вероятностей уровня моря.

Функция распределения вероятностей уровней проточных озёр зоны избыточного увлажнения зависит, главным образом, от функции распределения притока. Нормализации колебаний уровней проточных озёр не происходит, поскольку времена корреляции входных и выходных процессов мало различаются. В этом проявляется существенное отличие проточных озёр (Ладожское озеро, Байкал) от бессточных (Каспийского моря – без оттока в залив Кара-Богаз-Гол, Иссык-Куль, Балхаш).

Модель многолетних колебаний стока, вытекающей из озера, является следствием модели вариации уровня воды в водоёме в силу физической зависимости между этими процессами – стоком и уровнем. В естественных условиях, связь стока из озера от уровня воды удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией. Многолетние колебания стока озёрные реки описываются процессом авторегрессии второго порядка или же, в более общем случае, компонентой трёхкомпонентного марковского процесса [20, 22]. Для случая линейной зависимости между стоком из озера и уровнем получены аналитические зависимости между статистическими характеристиками входных процессов (суммарного поступления воды в водоём и испарения с зеркала водоёма) и соответствующими характеристиками стока озёрной реки.

Следует также отметить следующее обстоятельство, на которое обращал внимание В. Клемеш [23]. Уравнение водного баланса

естественного водоёма легко адаптируется для описания многолетних колебаний стока неозёрных рек. Тем самым, динамико-стохастические модели таких многолетних процессов, как вариации уровней бессточных и проточных озёр, стока озерных и неозёрных рек, эффективных (т.е. участвующих в формировании речного стока) запасов воды на водосборе оказываются различными формами наиболее общей модели – модели стохастического резервуара.

### **Прикладные аспекты динамико-стохастического моделирования многолетних колебаний уровней бессточных и проточных озёр**

Результаты моделирования уровненного режима Каспия были использованы при научном обосновании Федеральной целевой программы «Каспий», в проектах по добычи углеводородов в прибрежно-шельфовой зоне моря и других прикладных задачах [19, 24]. Исследование возможности оптимального управления уровнем Каспия было выполнено М.С. Маркишем [25].

Усиление экономической активности в прибрежно-шельфовой зоне Каспия актуализировало задачу оценки характеристик возможных экономических ущербов, вызываемых многолетними колебаниями уровня моря. В первую очередь, для решения этой задачи требуются безусловные и условные математическое ожидание и дисперсия уровня моря, что в сочетании с детерминированными зависимостями величин ущербов от уровня моря позволяет оценить вероятностные характеристики [19].

Динамико-стохастические применяются при оценке изменения статистических характеристик уровненного режима Каспийского моря под влиянием техногенных и климатических изменений водного баланса моря [19, 26]. При решении этой – «прямой» – задачи полезным оказывается применение зависимостей между параметрами входных процессов, формирующих колебания уровня моря (речного притока и эффективного испарения), морфометрических и гидравлических параметров моря, с одной стороны, и статистическими характеристиками уровня – с другой. При исследовании задачи водоснабжения Калининской АЭС, коэффициенты асимметрии и автокорреляции стока озёрных рек озёрной системы Удомля–Песьво находились «применительно к гидрологическим элемен-

там уровненного режима озёр, из которых реки берут свои начала» ([13], стр.202) по зависимостям, приведенным в [20].

Эти же зависимости применяются при решении некоторых т.н. «обратных» задач, когда по статистическим характеристикам **выходного** процесса (например, уровня воды в водоёме, или стока с водосбора) находятся соответствующие характеристики **входного** процесса (например, испарения).

Примеры решения обратной задачи – оценка статистических характеристик многолетнего испарения с акватории озера Байкал содержится в [22].

Одним из практически значимых результатов динамико-стохастического моделирования многолетних колебаний уровня озера Байкал был вывод о противоположном характере изменений дисперсий уровня озера и стока р. Ангары, вытекающей из озера. Было показано, что при уменьшении дисперсии колебаний уровня Байкала, как результата техногенного регулирования, происходит увеличение дисперсии колебаний стока р. Ангары. Тем самым, увеличивается вероятность экстремальных расходов р. Ангары, что создаёт угрозу нормальному функционированию социально-экономических объектов в бассейне этой реки [22].

Динамико-стохастические модели колебаний уровней применялись специалистами ИВП практически в исследованиях всех крупных естественных озёр на территории бывшего СССР. Так, объектами исследования, помимо упомянутых ранее водоёмов, были также Аральское море [27,28], озеро Иссык-Куль [29,30, 31], озеро Ханка [32], озеро Балхаш [33], озеро Сарыкамыш [34].

### **Задачи дальнейших исследований многолетних колебаний уровней естественных водоёмов**

Актуальной задачей была и остаётся оценка реакции колебаний уровней озёр на климатические и прямые техногенные изменения водного баланса.

Для такой оценки необходимо, во-первых, разработать модели основных составляющих водного баланса озёр, отражающих влияние меняющегося климата, т.е нестационарные модели составляющих водного баланса водоёмов.

Требует решения одна из важнейших и сложнейших задач – оценка техногенного влияния на водный баланс озёр на основе на

социально-экономического прогноза, практически всегда имеющего большую неопределенность. К сожалению, нет особых оснований полагать, что эту неопределенность можно уменьшить.

Отсюда следует необходимость рассмотрения различных вариантов водного баланса водоёма, и прогноз уровенного режима в целом становится многовариантным из-за неопределенности, например, в оценках будущего техногенного уменьшения притока в водоём. Обоснование рекомендации для практического применения такого прогноза представляется отдельной задачей.

Колебания уровня проточного озера и стока реки, вытекающей из озера, обычно связаны между собой. В естественном режиме эта связь, как показывают данные наблюдений на многих водоёмах, практически функциональная, близкая к линейной. Превращение естественного проточного озера в водохранилище нарушает функциональную зависимость стока из озера от уровня воды в нем. Это нарушение вызывается искусственным регулированием стока из озера, например, направленным на удержание расходов воды в некотором диапазоне. Следствием этого регулирования стока из озера оказывается увеличение размаха колебаний уровня воды в озере, как это происходит на озере Байкал. Исследование совместного управления уровнем проточного озера и стоком озерной реки представляется практически значимой задачей дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Некоторые положения статистической теории колебаний уровней естественных водоёмов и их применение к исследованию режима Каспийского моря / Тр. Первого совещания по регулированию стока. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1946. С. 76–93.
2. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоёмов / Тр. Гидропроекта. Сб.12. Энергия, 1964. С. 29–61.
3. Крицкий С.Н. Методика анализа и расчёта колебаний уровня замкнутых водоёмов // Водные ресурсы. №6, 1973. С. 9–26.
4. Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 157 с.
5. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 256 с.
6. Привальский В.Е. Линейная экстраполяция колебаний уровня моря на основе параметрической модели // Физика атмосферы и океана. Т. IX, №9, 1973. С. 973–981.

7. Привальский В.Е. Оптимальная линейная экстраполяция колебаний уровня замкнутых водоёмов // Водные ресурсы. №5, 1973. С. 17–28.
8. Привальский В.Е. Климатическая изменчивость. М.: Наука, 1985. 203 с.
9. Будыко М.И., Юдин М.И. О колебаниях уровня непроточных озёр // Метеорология и гидрология. №8, 1960. С. 15–19.
10. Багров Н.А. О колебаниях уровня бессточных озёр // Метеорология и гидрология. №6, 1963. С. 41–46.
11. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера–атмосфера». М.: ГЕОС. 2002. 230 с.
12. Раткович Д.Я. Гидрологические основы водообеспечения. М.: ИВП РАН. 1993. 428 с.
13. Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения. М.: Наука, 2003. 352 с.
14. Музылёв С.В. Теоретико-вероятностный анализ колебаний уровня бессточных водоёмов // Водные ресурсы. №5, 1980. С. 21–40.
15. Музылёв С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука. 1982. 283 с.
16. Найдёнов В.И., Подсечин В.П. О нелинейном механизме колебаний уровня водоёма // Водные ресурсы. №6, 1992. С. 5–11.
17. Хубларян М.Г., Найдёнов В.И. О тепловом механизме колебаний уровня водоёмов // Докл. АН СССР. Т. 319, №6, 1991. С. 1438–1444.
18. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 86 с.
19. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: Геос, 2003. 170 с.
20. Фролов А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озёр. М.: Наука, 1985. 103 с.
21. Фролов А.В. Моделирование влияния оттока в залив Кара-Богаз-Гол на плотность распределения вероятности уровня Каспийского моря // Математическое моделирование и численные методы. №3 (11), 2016. С. 79–92.
22. Фролов А.В., Выручалкина Т.Ю. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня озера Байкал и стока реки Ангары // Водные ресурсы. Т. 44, №3, 2017. С. 1–11.
23. Klemel V. Physically based stochastic hydrologic analisis / Advances in Hydroscience. V. 11, 1978. P. 285–356.
24. Голицын Г.С., Раткович Д.Я., Фортус М.И., Фролов А.В. О современном подъёме уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. Т. 25, №2, 1998. С. 133–139.
25. Маркиш М.С. Об оптимальном регулировании уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1982. С. 20–35.
26. Frolov A.V. The Caspian Sea as Stochastic Reservoir / Hydrological Models for Environmental Management. NATO Science Series 2. Environmental Security. Vol.2. Dordrecht/Boston/London. Kluwer Acad. Publishers. 2002. P. 91–108.

27. Коренистов Д.В., Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Шимельмиц И.Я. Проблема Аральского моря // Водные ресурсы. №1, 1972. С. 138–162.
28. Иванова Л.В. Гидрологические аспекты проблемы Аральского моря // Водные ресурсы. №2, 1992. С. 39–49.
29. Раткович Д.Я. Водный баланс и режим уровня озера Иссык-Куль // Водные ресурсы. №5, 1977. С. 20–33.
30. Гринёв М.А. Об управлении многолетним уровенным режимом оз. Иссык-Куль // Водные ресурсы. №1, 1992. С. 127–141.
31. Кулжабаев Ж. Об управлении режимом уровня озера Иссык-Куль // Водные ресурсы. №4, 1982. С. 41–47.
32. Баканов К.Г. Нелинейная вероятностная модель проточного озера // Методы построения и анализа моделей сложных природных систем. Владивосток, 1986. С. 114–129.
33. Раткович Д.Я., Иванова Л.В., Новикова Н.М., Фролов А.В. О проблеме озера Балхаш // Водные ресурсы. №3, 1990. С. 5–23.
34. Санин М.В., Алишеров Н.Б., Фролов А.В. Динамико-стохастическое моделирование процессов заполнения бессточных водоёмов // ДАН СССР. Т. 316, №6, 1991. С. 1472–1475.

# **УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ, ПРОБЛЕМЫ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ**

## **Экономические проблемы управления водными ресурсами и водным хозяйством**

*В.И. Данилов-Данильян*

Управление изменяющейся либо нестационарной (это не синонимы!) системой существенно сложнее, чем системой неизменной, стационарной или хотя бы квазистационарной. Но ещё сложнее управление системой, которая должна измениться, но никак не меняется, во всяком случае – к лучшему. Здесь, естественно, имеется в виду управление как задача, которую следует решать исходя из общественного запроса, предъявляемого управляемой системе. В данной статье в качестве управляемой рассматривается система, включающая природно-ресурсную подсистему (водные ресурсы) и производственно-экономическую подсистему (водное хозяйство).

Неизбежно встаёт вопрос: какую задачу решает реальная система управления? Ту ли, которую необходимо решать в соответствии с требованием общества? Ответ на него давно известен при важном дополнительном условии: если отсутствует активный, свободный, действенный общественный контроль (в самых разнообразных формах – от избирательных и судебных институтций до СМИ). При этом условии, т.е. при отсутствии или слабости общественного контроля, в каждой конкретной системе управления бюрократия подменяет поставленную обществом задачу совсем другой, а именно, преследует цель собственного сохранения, укрепления, расширения, создания благоприятных условий для коррупции и т.п. [1–3]. Однако что бы ни происходило в реальности, проблема рационального управления для удовлетворения социального запроса, общественной потребности не теряет не только теоретического интереса, но и сохраняет практическое значение: её анализ ярче вывечивает недостатки статус quo и указывает возможные направления его улучшения, тем самым отвечая – пусть даже не проявленной чётко, не осознанной в достаточной мере – другой потребности общества: понимать, что с ним происходит и куда надо двигаться. Далее рассматривается по

преимуществу экономический аспект этой проблемы, некоторые другие аспекты лишь затрагиваются – в той мере, в какой необходимо для экономического анализа.

### **Состояние объекта управления и управляющей системы**

Состояние водных ресурсов (прежде всего, в отношении качества воды в источниках питьевого водоснабжения) в наиболее экономически развитых и плотнее заселённых регионах страны нельзя признать удовлетворительным. Материально-техническая база водного хозяйства уже в конце 1990-х гг. была морально устаревшей и физически изношенной и – за редкими исключениями – продолжает деградировать по сей день. Соответственно, неприемлемо часто фиксируются нарушения санитарно-гигиенических норм в воде, подаваемой через системы питьевого водоснабжения. В очень многих случаях совершенно недостаточны системы защиты от опасных гидрологических явлений (наводнения, размыв берегов, на которых расположены жилые дома, хозяйствственные объекты, и пр.) – перечисление можно продолжать. Это – «физическая» сторона дела, внушающая обеспокоенность всем и каждому.

Система управления водными ресурсами и водным хозяйством явно не соответствует современному уровню, отставание России от развитых стран составляет здесь несколько десятилетий. Все управленические цепочки, как известно, начинаются сбором информации. И уже первое звено – система мониторинга водных объектов – неудовлетворительно. Если уровни воды на водотоках худо-бедно измеряются, то мониторинг расходов воды подчас выглядит как-то экзотикой. На Амуре более чем на ста створах измеряют уровни, в лучшем случае на трёх – расходы. Это предельный случай, но и в среднем ситуация неблагополучная: не более четверти станций (или постов) дают информацию о расходах. Мониторинг качества воды поставлен ещё хуже. От регулярного взятия проб остались только воспоминания: там, где раньше брали три, а то и шесть проб в сутки, теперь нередко довольствуются одной в неделю – нет ни приборов, ни реагентов, ни персонала, ни денег. Мониторинг гидроэкосистем (как и экосистем суши) спорадически проводят только научные организации. Регулярного мониторинга состояния дна, донных отложений нет, то же относится и к мониторингу водоохранных

зон<sup>1</sup>. Единой системы мониторинга, куда должны поступать данные, собираемые различными ведомствами и организациями, не существует даже в проекте<sup>2</sup>.

Каково качество информации, таковы и методы её обработки. Хотя научные исследования проблем управления водными ресурсами и водным хозяйством в России соответствуют (пусть даже не всегда и не во всём) мировому уровню, они почти не внедряются в практику. И дело не только в слабой информационной базе. Для использования современных методов управления (а это, прежде всего, информационные системы, компьютерные модели, интерактивные системы и пр.) необходимы квалифицированные кадры гидрологов и водохозяйственников – а их нет, и практически никто их теперь не готовит. А если нет квалифицированных кадров, то нет и спроса на разработки, использование которых невозможно без таких кадров. Круг замкнулся.

Неадекватность структуры существующей ныне в России системы управления водными ресурсами и водным хозяйством стоящим перед этой системой задачам давно стала притчей во языцах, но никаких изменений к лучшему не видно на протяжении многих лет. Нет органа исполнительной власти, который отвечал бы и за количество поставляемой потребителям воды, и за её качество, и за распределение этого количества при этом качестве; решал бы проблемы совместного использования водных ресурсов экономическими агентами, принципиально различающимися по типу водопользования; оптимизировал бы планы защитных мер от негативного воздействия водной стихии; целенаправленно занимался бы проблемой охраны вод; совершенствовал бы как экономические, так и административные методы управления в своей сфере; выступал бы от имени государства заказчиком на научно-исследовательские и проектные работы, на подготовку кадров, на конструирование и импорт оборудования и приборов, и пр., и пр. Без такого органа

<sup>1</sup> Между тем в Водном кодексе, действующем с 2006 г., ясно сказано: «Государственный мониторинг водных объектов состоит из: ... 2) мониторинга состояния дна и берегов водных объектов, а также состояния водоохраных зон» – гл. 4, ст. 30, п. 4 [4]

<sup>2</sup> В 1990-е гг. такая попытка была: в 1993 г. принято постановление Правительства РФ об организации Единой системы государственного экологического мониторинга (ЕГСЭМ), вот только среди многих министерств и ведомств, которым тогда была поручена эта работа, не нашлось ни одного такого, которое хотело бы её выполнять, – кроме, естественно, инициировавшего принятие этого постановления Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ

события развиваются по сценарию, именуемому «лебедь, рак да щука» (вполне подходит и другое название: «у семи нянек дитя без глаза»).

Неразбериха в структуре системы управления водными ресурсами и водным хозяйством имеет «прочное» юридическое основание: такая же неразбериха царит и в законодательстве. Пресловутый Водный кодекс РФ 2006 г. [4], несмотря на все последующие дополнения и изменения, не решает вопросов охраны водных ресурсов, экономики водопользования, распределения полномочий между уровнями и между органами государственной власти и т.д. Водный кодекс РФ 1995 г. [5] содержал хотя бы попытку ответить на некоторые из таких вопросов, пусть даже не всегда самую удачную. Когда было решено его заменить, два с лишним года специалисты рассматривали различные варианты, делали свои предложения, вносили поправки в законопроект, блуждавший между комитетами Государственной Думы, дискутировали с её депутатами на парламентских слушаниях и пр. Вдруг, как чёртик из табакерки, выскоцил совсем другой, никакими специалистами не рассматривавшийся и нигде толком не обсуждавшийся совершенно новый текст, который и был принят Думой без промедлений во всех трёх чтениях. Авторов этого текста ни в какой мере не интересовали ни гидрология, ни экология, ни география... Заботили их по преимуществу права на владение, распоряжение и пользование объектами, да ещё глава о мониторинге (заимствованная из обсуждавшегося основного варианта) каким-то мистическим образом попала в принятый Думой в 2006 г. Водный кодекс.

Неудачная попытка заменить советскую систему стандартизации и нормирования техническим регулированием по западным образцам имела своим следствием то, что от понятия «стандарт» в сознании производственников и управляющих ими государственных чиновников остались лишь смутные воспоминания. Как в ста-ринном китайском рассказе о юноше из Шоулина, который захотел ходить так, как ходят в Ганьдане, и отправился туда учиться, но из этого ничего не вышло, более того, юноша забыл, как ходят в Шоулине, и вернулся домой ползком<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Этот рассказ вспоминает Акутагава Рюносэ – см. [6, с. 386]

Особенности российской системы управления водными ресурсами и водным хозяйством заслуживают гораздо более подробного обсуждения, чем возможно в данной статье. Отметим лишь, что они присущи не только данной отрасли, они характерны для всей системы государственного управления в России. Специфичны лишь конкретные проявления, причём специфичность определяется физическими и прочими свойствами объекта управления, «внешними» по отношению к системе управления факторами. Впору говорить о некоем коллективном бессознательном (примерно по К.Г. Юнгу [7]), присущем контингенту занятых в этой системе. Если соответствующего компонента в психике у человека нет, он не задержится в этом контингенте, даже если в него случайно попадёт, – какими бы талантами и умениями он ни обладал. Однако оставим социальным психологам задачу выявить основные архетипы, определяющие этот феномен.

Состояние водоохраных зон, как правило, способно внушить ужас. Тут не действуют никакие механизмы – ни экономические, ни административные, ни юридические. Казалось бы, надо просто власть употребить, но что делать, если в данном случае как раз этого власть и не хочет? В случае экономических механизмов (как и административных и судебных) человеческий фактор действует вполне аналогично его роли в функционировании сложных технических устройств, только значение уже упомянутого коллективного бессознательного в управлении государством и экономикой несравненно важнее, чем техническими системами, и последствия ошибок гораздо масштабнее и серьёзнее.

Экономический механизм водопользования и охраны вод похож на старый грузовик, который по полному бездорожью тащит неподъемный груз, и на каждом ухабе какая-то часть груза вываливается из машины. Груза всё меньше, зато ухабы всё глубже. Самый кричащий недостаток – тарифы на водоснабжение, при которых большинство (едва ли не подавляющее) водохозяйственных организаций, т.е. водоканалов, не могут свести концы с концами. Уму непостижимо, как может существовать экономика, в которой организации, абсолютно необходимые обществу, десятилетиями влачат такое существование. Естественно, никакое законодательство ничего не

сообщает о том, что делать, если умереть – с позиций общества, государства – нельзя, а жить в этой реальности невозможно.

Плата за водопользование держится на столь же «безупречных» базовых ставках – подстать тарифам. Одни за воду не платят вообще (орошаемое земледелие, например), другие находятся примерно в той же ситуации, что водоканалы. Скажем, АЭС «Полярные зори» (Мурманская область) с прямоточной системой водоснабжения, включённой, кстати, в реестр лучших доступных технологий, этими платежами доведена почти до разорения, а перейти к оборотной системе не может – климатические условия не позволяют. Ставки платежей за негативное воздействие на водные объекты никогда, ни при каких темпах инфляции адекватно не индексировались. Поскольку они с самого начала, т.е. с 1992 г., были сильно занижены (дабы окончательно не загубить дышавшие на ладан предприятия), то практически всегда выполняли и выполняют только фискальную, но не регулирующую функцию. Далеко не все из вполне наблюдаемых, измеряемых типов негативных воздействий на окружающую среду, в том числе и водную, охвачены этими платежами.

Экологические фонды, существовавшие с 1992 г., и водные фонды<sup>4</sup>, организованные в 1996 г., были ликвидированы в 2000 г. в ходе очень неуклюжей бюджетной реформы. Надоело объяснять, зачем эти фонды нужны, почему их ликвидация была ошибкой и пр., надоело слушать обещания и заявления о намерении восстановить их. Сколько можно толочь воду в ступе?

### **О сложности управления водными ресурсами и водным хозяйством**

Весьма серьёзные объективные причины сложности задач управления водными ресурсами и водным хозяйством многократно назывались и изучались. Попробуем посмотреть на их совокупность.

1. Монопольность рынка со стороны поставщика воды и большинства видов услуг водного хозяйства, причём монополия естественная, никакими антимонопольными мерами неустранимая. Следствием этого служит отсутствие рыночных цен, более того –

<sup>4</sup> Теперь Водным фондом называется совсем другое, а именно, совокупность водных объектов в пределах территории РФ, включенных или подлежащих включению в государственный водный кадастровый – по аналогии с Лесным фондом и Земельным фондом

каких бы то ни было рыночных ориентиров. Эта ситуация ещё более усугубляется обстоятельствами, указанными в следующем пункте.

2. Жёсткие социальные ограничения. Именно они – причина неадекватно низких тарифов на воду в российском ЖКХ, бесплатности воды для орошения и пр. От этих ограничений никуда не уйти, но они должны совсем иначе, чем сейчас, трансформироваться в элементы финансово-экономического механизма в целом (а не в его отраслевую, т.е. водную, часть).

3. Как никакой другой объект государственного управления, водные ресурсы и водное хозяйство отличаются высокой неопределенностью входной информации (и, как следствие, параметров управления) – по количеству, качеству, режиму, потребностям и спросу на воду и услуги обеспечения водопользования. Все проблемы гидрометеорологического прогнозирования переносятся в управление водными ресурсами и водным хозяйством, но при этом обусловливаемая ими сложность управления усиливается социально-экономической неопределенностью, в какой-то своей части коррелирующей с «гидрометеорологией», но помимо этого имеющей множество причин, ни с погодой, ни с водой, ни с климатом никак не связанных. Эта многосторонняя, многофакторная неопределенность – вовсе не такое отсутствие детерминизма, когда вместо детерминистских зависимостей приходится прибегать к теоретико-вероятностным описаниям с известными статистическими характеристиками. «Водная» неопределенность, увы, не обладает свойствами, при которых возможны адекватные статистические описания, проверка статистических гипотез даёт положительные результаты и т.п. При такой неопределенности использование, например, математических моделей оптимизации возможно только в интерактивном режиме, с набором сценариев возможного развития событий [8].

4. Вода как потребительская ценность характеризуется не только количеством, но и качеством. Ничего особенного в этом ещё нет. Специфика воды проявляется в зависимости качества воды в источнике от её количества, забираемого из этого источника: чем больше отбор воды, тем ниже её качество. При этом соответствующая зависимость, конечно же, неопределенная (в отличие, например, от ситуации в горном деле, когда заранее достаточно хорошо известно, как будет изменяться концентрация полезного компонента в извлекае-

мой горной массе, т.е. её качество, по мере отработки месторождения).

5. Водное хозяйство – единственная отрасль, одновременно и ресурсная (производственная, поставляющая другим отраслям необходимое им сырьё – воду), и инфраструктурная (т.е. создающая условия, требуемые для их деятельности). Производственные и инфраструктурные отрасли недаром разделены в экономической науке – они различаются не только по функции в народном хозяйстве, но и по способам их описания и анализа, характеристикам деятельности, методам учёта, прогнозирования и планирования.

6. Водные ресурсы – единственный вид ресурсов, для которых характерны принципиально различные типы пользования, принципиально многоцелевое использование: жилищно-коммунальное хозяйство, промышленность и сельское хозяйство используют воду, извлечённую из источников, их требования касаются количества и качества воды; гидроэнергетика использует потенциальную (гравитационную) энергию воды, пропуская её через турбины гидроэлектростанций; водный транспорт использует водные пути по водотокам и водоёмам и предъявляет требования к глубинам; лесосплав использует водотоки как водные пути и интересуется скоростями течения и геометрией русла; рыболовство более всего беспокоится состоянием водных экосистем, а в случае гидростроительства ещё и рыбопропускными сооружениями, эффект которых, впрочем, оказался куда меньшим, чем когда-то ожидалось; рыбоводству нужна вода достаточно высокого качества; рекреационная отрасль заинтересована не только в качестве воды, но и в состоянии прибрежных экосистем, которое всегда тесно коррелирует с состоянием водного объекта. Особый вид водопользования – сброс сточных вод; он неизбежен у всех водопотребителей, производится (или происходит) различными способами и с различными относительными потерями на так называемое безвозвратное водопотребление. Различия отраслей-водопользователей в зависимости от роли, которую играют вода и водные объекты в их функционировании, хорошо известны. Это обстоятельство вносит радикальное осложнение в задачи планирования и регулирование водохозяйственной деятельности (точнее было бы сказать: водохозяйственных деятельности). Согла-

сование интересов водопользователей различных типов приводит к задачам управления, не воспроизведимым в других отраслях.

7. Необходимо, наконец, подчеркнуть совершенно особую экологическую роль воды, водной среды, водных объектов. Вода – главный экосистемообразующий фактор в биосфере, и её возможность выполнять эту функцию оказалась чрезвычайно зависящей от водопользования, его объёмов и способов реализации [9], т.е. технологий, а также и множества других факторов, не входящих в сферу водного хозяйства, но безусловно относящихся к охране вод, т.е. таких, которые должны быть включены в компетенцию управления водными ресурсами. Отсюда проистекают многие проблемы, неведомые системам управления другими отраслями, и ещё более возрастает неопределенность исходной информации.

Приведённый здесь далеко не полный обзор причин, в силу которых проблема управления водными ресурсами и водным хозяйством оценивается как весьма сложная, возможно, даёт представление об уровне этой сложности. В неё вплетены не только все задачи, которыми занимаются микроэкономика, теория управления отраслями экономики, теория фирмы (на этих задачах в силу очевидной потребности в их применении в рассматриваемой здесь сфере внимание не фиксировалось), но и ряд нетипичных или плохо разработанных задач и, главное, сугубо специфичные для водной отрасли, практически не затронутые экономической наукой вопросы. В совокупности они составляют такую проблему, подходов к комплексному, целостному решению которой современная экономическая теория не имеет. Да и вряд ли возможно подобное решение, для этого проблема слишком богата, разнопланова и, возможно, даже внутренне противоречива. Тем более интересно проанализировать возможности применения к проблемам управления водными ресурсами и водным хозяйством аналитического аппарата экономической теории, хотя бы некоторых разработанных в ней понятий, отделить реальные перспективы от иллюзий.

### **Водная рента**

Проблематика водной ренты, по-видимому, слишком сложна, так что экономическая наука ею предпочитает не заниматься. Вот последняя монография, посвящённая проблеме ренты [10]; о ренте

сказано много, в том числе и полезного, но только не о водной, самих слов «вода», «водная», «водный» в тексте не найти. В другой не так давно вышедшей книге [11] чего только нет: и рента, и квазирента, и антирента... Только о водной ренте – ни слова; и здесь соответствующие слова просто отсутствуют. Между тем природной ренте посвящена целая глава, в ней три параграфа – о земельной, горной и лесной ренте. Книга [12] имеет многообещающее название: «Рентные отношения водопользования в России», но, увы, хотя определение водной ренты на с. 49 дано, но совсем не выявлена её специфика; рентными отношениями автор, по-видимому, называет любые связанные с водой платежи, приводит статистические данные о них, рассматривает регулирующие их законодательные и нормативные акты и т.п.; какое отношение всё это имеет к собственно водной ренте, из книги понять нельзя. Конечно, применение, например, теоремы Куна–Таккера к неким модельным построениям – очень увлекательное занятие, но дело-то ведь в том, что условия Куна–Таккера не выполнены ни для одной похожей на реальность водноресурсной или водохозяйственной модели.

О ренте можно рассуждать применительно к любому фактору (ресурсу) производства. Рентой, доставляемой фактором производства, в экономической теории называют обусловленную использованием этого фактора долю прибыли, получаемой данным производством (в принципе, можно вместе прибыли взять и другие стоимостные

характеристики результата производства; прибыль – наиболее распространённый, чаще используемый, относительно просто калькулируемый и понятный показатель). Соответственно, природная рента – доля прибыли, обусловленная использованием природного ресурса (например водного), «вклад» ресурса в прибыль. В каждом конкретном случае, прежде всего, следует договориться, что понимается под производством и что – под ресурсом.

Первичная производственная ячейка – предприятие, для него можно считать вполне понятным, что такое его прибыль (естественно, за конкретный период, при анализе ренты это всегда год) и какие ресурсы (факторы производства) оно использует. Следующие уровни – совокупности предприятий: всех, эксплуатирующих некий общий ресурс; всех, расположенных в одном районе (географичес-

ком или административном); всех, расположенных в одном государстве, и т.п.

Обычно нет проблем и с определением природного ресурса, если это земля, лес или минеральный ресурс. В первом случае это – участок земли, достаточно однородный, одноцелевого использования. Если в качестве земельного ресурса фигурирует более сложный земельный объект, то его всегда можно разделить на относительно однородные участки одноцелевого использования и рассматривать объект как их совокупность. В рыночной экономике у таких участков есть очень важное качество: известна их рыночная цена. Земельные участки продаются на рынке, причём представляют собой (как правило) массовый товар, так что их рыночные цены обладают, как предполагается, теми свойствами, из-за которых определяющий их рынок обожествляется почти всеми экономическими школами. Похожая ситуация с лесными ресурсами; то обстоятельство, что лесные участки чаще не продаются, а сдаются в аренду, не служит осложнением: арендная плата – один из частных случаев рыночной цены. В случае минеральных ресурсов природный объект определяется вполне однозначно – месторождение, но рыночной цены он не имеет: месторождения не продаются на рынке, а даже если продаются, не являются массовым товаром в силу их уникальности (геологи говорят: двух одинаковых месторождений не бывает). Железная руда, уголь или нефть – не ресурсы, а продукты, получаемые в результате эксплуатации минеральных ресурсов – месторождений.

С водными ресурсами – сплошные неприятности. Нет однозначности даже в определении природного объекта – носителя или источника ресурса, т.е. водного объекта. Дефиниция, приведённая в Водном кодексе РФ (гл. 1, ст. 1, п. 4): «водный объект – природный или искусственный водоём, водоток либо иной объект, постоянное или временное сосредоточение вод в котором имеет характерные формы и признаки водного режима» [4], – представляет собой замаскированную тавтологию (её общая формула: А есть то, что обладает свойствами А). Вот Конаковская теплоэлектростанция использует воду Волги. Если требуется определить водную ренту, производимую этой ТЭС, то какой объект надо рассматривать как природный ресурс: Волгу, Иваньковское водохранилище, на берегу которого стоит электростанция, водохозяйственный участок? Легко привести

аргументы в пользу каждого из этих вариантов, и той однозначности, которая имеет место в случаях земельных, лесных и минеральных ресурсов, очевидно, нет. Едва ли не всегда принимается грубое упрощение задачи: под водной рентой понимают только ту её часть, которая производится при водопотреблении, т.е. вследствие забора воды (аналогично, впрочем, поступают и в случае лесных ресурсов: поскольку из всех полезностей леса на аукционных торгах в расчёт принимается только древесина, при оценке лесной ренты в расчёт берут только объём древесины). Но упрощение состоит не только в игнорировании типичного случая, когда водный ресурс используется и для других, помимо водопотребления, целей: каждый водопотребитель осуществляет и сброс воды, и если качество сточных вод ниже, чем воды в объекте-приёмнике, то и на операции сброса заведомо имеет место эффект образования водной ренты (это – лишь простейшая из ситуаций, которые следовало бы рассмотреть в связи с задачей выявления водной ренты при сбросе сточных вод).

Если рассмотреть водопользователей различных типов, окажется, что и природные объекты, от которых зависят результаты их деятельности, разные: ЖКХ и рыболовов может интересовать вся река, гидроэнергетиков – её участок от истока до плотины, транспортников – только судоходный участок. Кого-то всё это, может быть, и не смущает, поскольку можно рассуждать так: рассмотрим все предприятия, использующие водные ресурсы, например, Волги, определим для каждого из них вклад этих ресурсов в его прибыль, сложим все результаты и получим водную ренту для всей Волги. Однако уже первый шаг этой процедуры корректно реализовать не удастся.

В самом деле, если производство использует различные факторы (ресурсы) и каждый из них имеет рыночную цену, так что можно вычислить затраты каждого из них на получение результата производства, то совершенно естественно полагать, что вклад каждого ресурса в этот результат пропорционален его затратам (технические трудности, обусловливаемые, например, разновременностью затрат и т.п., относительно легко преодолимы). Но если у чего-либо нет рыночной цены, то нет и никакой основы для определения его ценности (стоимости), рынок – единственный источник объективной информации о цене, ценности, стоимости. От того, каков рынок (сво-

бодный с совершенной конкуренцией, монополистический, монопсонический, массовый, сингулярный и т.д.), зависят свойства определяемых им цен, но существование цен определяется существованием рынка или хотя бы предположением о некоем гипотетическом рынке. Если в экономическом тексте говорится о том, что рыночная цена какого-либо товара «неправильная» (занятая или заниженная, неравновесная, неоптимальная и т.п.), то за этим всегда стоит сравнение определившего её реального рынка с неким гипотетическим рынком, иначе текст – не экономический (поэтический, мистический, юмористический и пр.). После неуклюжих попыток заменить деньги «трудовыми талонами», а в качестве цен использовать затраты труда, советская система ценообразования перешла к элементарной, бесхитростной имитации рынка, разумеется, с очень тяжёлым прессом волонтаризма руководителей, осложнённого невежеством большинства исполнителей. Рынок близорук, он порождает силы, разрушающие его самого или даже общество, где он господствует, его господство приводит к так называемым «провалам» (внешним эффектам, экстерналиям) и т.д., и т.п., но другого источника цен и, тем самым, информации для определения ценности, стоимости нет и не предвидится. Сами понятия цены, ценности, стоимости порождены обменом, рынком и без привязки к нему вряд ли сохранят какой-нибудь смысл. (Для тех, кто надеется с помощью трудовой теории стоимости в конце концов обойтись без рынка, заметим, что разные виды труда иначе как посредством рынка сопоставить не удастся. Рынок не будет нужен только такому обществу, которое в принципе не нуждается в подобных сопоставлениях и соизмерениях).

Имеет ли решение предельно упрощённая задача, когда водная рента исчисляется не для всех водопользователей, а только для водопотребителей (т.е. забирающих воду из природного объекта), и понимается под ней вклад не водного ресурса, а только забранной воды в экономический результат деятельности водопотребителя? Повернёмся лицом к реальности и вспомним, что никаких рыночных цен, удовлетворяющих хотя бы минимальным требованиям экономической теории, на водные ресурсы не существует. Единственный предлагаемый способ обойти эту трудность состоит в том, чтобы принять за водную ренту разность между прибылью (или её

частью) и общими затратами всех остальных факторов производства. Пусть в годовом исчислении  $D$  – прибыль,  $a_i$  – затраты фактора  $i$ ,  $i=0, 1, \dots, n$  (водный ресурс в число этих факторов не входит),  $r$  – водная рента,  $C$  – общие затраты. Тогда  $r = D - \sum_{i=1}^n a_i$ ;  $C = r + \sum_{i=1}^n a_i$  и, очевидно,  $D=C$ . Но если прибыль равна затратам, то рента для каждого фактора производства, в том числе и водного ресурса, равна нулю:  $r=0$ . Чтобы избежать этого нелепого вывода (хотя он почти не искажает реальность для большинства российских водоканалов), предлагаются в формуле для водной ренты брать не саму чистую прибыль, а уменьшать её на среднюю норму прибыли  $k$  ( $0 < k < 1$ ):  $r = (1-k)D - \sum_{i=1}^n a_i$ . В модельной экономике это предложение выглядит вполне убедительно. Но средняя норма прибыли – экономическая абстракция, «средняя температура в больнице». Вопрос о ней по сути тот же, что и о едином нормативе экономической эффективности, десятилетиями дискутировавшийся советскими экономистами. В каждой отрасли «своя» средняя норма прибыли, как и «свой» норматив эффективности, причём ни то, ни другое в наши дни ни для каких отраслей толком не известно. И это не случайно: для рынка прибыль, может быть, и единственный критерий, но дальновидный предприниматель руководствуется и другими критериями (устойчивость, желательность или, наоборот, опасность экспансии, то же относительно конкурентной тактики – агрессивной или миролюбивой, и пр.), которые влияют на краткосрочную (годовую) прибыль, причём всегда в сторону её уменьшения; значимость этих других критерии с годами только возрастает.

Таким образом, даже при предельных упрощениях, игнорирующих многообразие типов водопользования и иные отмеченные ранее особенности водных ресурсов, убедительного решения задачи об исчислении водной ренты не видно. Однако это обстоятельство, безусловно, досадное с теоретической точки зрения, не вносит особых осложнений в задачи управления водными ресурсами и водным хозяйством. Ради каких целей регулярно поднимается вопрос о природной, в том числе водной ренте? Прежде всего, ради того чтобы «отобрать» природную ренту у тех, кто, не будучи владельцем природных ресурсов (они согласно Конституции РФ являются, главным образом, общенародной собственностью), эксплуатирует их и присваивает её себе. Но в процессе перераспределения при-

родной ренты задействованы многие налоги и сборы (налоги на прибыль, на добавленную стоимость, на добычу полезных ископаемых, подоходный, на имущество, а также пошлины и пр.), и при надлежащей настройке их параметров они способны вполне успешно справиться с задачей «отбора» природной ренты [13]. Такая настройка, конечно, требует экономического анализа с учётом социальных факторов, расчётов, в том числе и по экономико-математическим моделям, и т.п. Но ещё важнее обратная связь налоговой системы с социально-экономической реальностью, позволяющая своевременно корректировать эти параметры при обнаружении неизбежных несоответствий между приближёнными расчётами и непрерывно изменяющейся реальностью (с расчётами многих ставок налогов и сборов и других параметров дело обстоит немногим лучше, чем с водной рентой). Отметим, что идея полностью отбирать у производителей ренту за использование факторов, которые являются собственностью государства, сама по себе порочна: она лишает предпринимателя стимула искать лучшие условия производства и лучшие сочетания производственных факторов [13].

### **Стоимостная оценка водных ресурсов**

Задача стоимостной оценки природных ресурсов с давних пор рассматривалась при попытках исчислить такие макроэкономические показатели как национальное богатство и пр. Новый смысл она приобрела в связи критикой показателя валового внутреннего продукта как не отражающего экологические издержки и истощение природных ресурсов. Для расчёта скорректированных чистых накоплений(*adjusted netsavings*)<sup>5</sup> – наиболее известного из показателей, лишенных этого весьма существенного недостатка – требуется не оценка «валовых» природных ресурсов, а лишь её изменение по итогам года, т.е. оценка затраченных невоспроизводимых ресурсов и некомпенсируемые естественным возобновлением потери воспроизводимых ресурсов. Такую оценку можно получить с большей точностью, чем оценку «валовых» природных ресурсов, тем не менее ООН приняла решение рекомендовать всем странам рассчитывать именно валовые оценки. ООНовских статистиков, озабоченных, главным образом, международными сопоставлениями, прежде всего интере-

<sup>5</sup> Определения и методы расчёта эколого-экономических макропоказателей см. в [14]

суют минеральные ресурсы, в меньшей степени – лес и ещё в меньшей – водные и недревесные биологические ресурсы. Методологические трудности стоимостной оценки водных ресурсов, по-видимому, либо не были приняты во внимание при выдаче рекомендаций, либо сознательно проигнорированы, чтобы не утратить «полноты картины», хотя такая полнота – не более чем иллюзия<sup>6</sup>. Главные из этих проблем – те же, что и при расчёте водной ренты. Первопричина трудностей отсутствие ценовых рыночных ориентиров на водные ресурсы, осложняющие факторы разнообразны, но основной среди них – многоцелевое использование водных ресурсов, принципиально различные типы водопользования. Хотя возможна и инверсия этих причин: отсутствие рыночных ориентиров можно аргументировать имманентной «нерыночностью» водных ресурсов, объяснить их «неторгуемость» запутанными отношениями между водопользователями различных типов, совместимых в своей водо-эксплуатационной деятельности и, вместе в тем, остро конкурирующих за водные ресурсы (имеется в виду не обычная конкуренция за воду, характерная для водопотребителей в условиях дефицита воды, а споры о режимах пользования, как это происходит между гидроэнергетикой, с одной стороны, и гидромелиорацией, водным транспортом, рыболовством – с другой).

Проблема чувствительности результата экономических расчётов к точности исходных данных часто недооценивается. Ещё 30 лет тому назад в [16] на основе анализа официальной советской статистики было показано, что при характерной для неё точности данных приведённые затраты для одного и того же объекта имеют интервал разброса практически такой же величины, как и сами оцениваемые приведённые затраты. Следовательно, совершенно бессмысленно сопоставлять конкурирующие проекты по этому показателю – в таком интервале обычно умещаются значения приведённых затрат для всех таких проектов. Трудно ожидать, что при той точности данных, которые должны использоваться для стоимостной оценки водных ресурсов, и при отсутствии исходной информации для каких бы то ни было оценок по ряду аспектов водопользования разброс результата в данном случае будет меньше, чем при калькуляции

<sup>6</sup> Впрочем, неполнота информации не смущает ООНовских статистиков. Например: «В случае, когда данные отсутствуют, скорректированные чистые сбережения не включают ущерба от выбросов твердых частиц» [15]

приведённых затрат. Вряд ли работа по калькуляции этой оценки, инициированная ООН, даст результаты, которые будут представлять какую-либо теоретическую или практическую ценность. Конечно, они будут использоваться средствами массовой информации: для современного обывателя характерно слепое доверие к сообщениям, начинающимся словами «По данным ООН...» и т.п., но и в этом направлении кроме пустого шума никаких результатов ожидать не следует.

### **Платежи и фонды**

Связанные с водными ресурсами и водопользованием платежи в бюджет (неважно, как они называются: налогами, сборами, фиксированными платежами и т.п.) подразделяются на два типа: экологические, т.е. определяемые негативным воздействием на водные объекты и зависящие от объёма и степени опасности воздействия, и пользовательские (название условное), т.е. определяемые использованием водных ресурсов в любых целях, не только для получения прибыли.

Экологические платежи реализуют принцип «загрязнитель – платит», принятый мировым сообществом после Конференции ООН по окружающей среде (Стокгольм, 1972). Идея подобных платежей была предложена ещё в начале 20 в. английским экономистом А.С. Пигу [17]. Эти платежи он называл корректирующим налогом и полагал, что они могут «сгладить» внешние эффекты (провалы рынка), т.е. такие косвенные последствия деятельности экономических агентов, которые не регулируются рынком, но наносят ущерб другим экономическим агентам (типичный пример –бросок загрязнённых стоков в реку, который обуславливает ущерб водопотребителям, рыбному хозяйству, гостиничному бизнесу и пр.). Такой налог Пигу рассматривал как средство интернализации внешнего эффекта, т.е. вовлечения в рыночную систему оценивания фактора, который ранее рынком как бы не замечался<sup>7</sup>. Возможны различные формы реализации экологических платежей.

В России экологические платежи были законодательно введены в 1992 г. для трёх видов загрязнений: выбросов в атмосферу, сброс в

<sup>7</sup> Экономисты ультралиберальной ориентации активно критикуют подход Пигу, основываясь на так называемой теореме Коуза – утверждении, весьма далёком от экономических реалий (см. об этом [18])

водные объекты, размещение твёрдых отходов. Система использовала принцип предельно допустимых концентраций (ПДК) в обоих его предназначениях – для характеристики уровня загрязнения природных объектов и воздействий на них. Все загрязняющие вещества были распределены по классам опасности (в соответствии с ПДК для водных объектов), и для тонны загрязнения из каждого класса определена базовая ставка. Платёж по конкретному загрязняющему веществу для источника его сброса в водный объект зависел от объёма сброса и трёх параметров: базовой ставки, предельно допустимого сброса (ПДС, общее название – предельно допустимое воздействие, ПДВ)) и временно согласованного сброса (ВСС) (общее название – временно согласованное воздействие, ВСВ). Для объёма сброса не выше ПДС применялась базовая ставка, для сброса из интервала от ПДС до ПСС она умножалась на 5, для превышающего ПСС – на 25 (аналогично для выбросов в атмосферу и размещения твёрдых отходов). Такая система действовала в течение 1990-х гг. и с несущественными изменениями работает до сих пор, но в 2014 г. принято законодательное решение о её замене системой, основанной на принципе наилучшей доступной технологии (НДТ).

ВСВ назначались исходя из экономических или социальных мотивов – в случае, если технология предприятия-загрязнителя не позволяла снизить воздействие на окружающую среду при работе в штатном режиме до уровня ПДВ, средств на замену технологий у предприятия заведомо не было, а его закрытие было недопустимо по упомянутым мотивам. 25-кратные ставки фактически применялись только для загрязнений, произошедших вследствие нарушений штатного режима по вине персонала. В принципе допускалась дифференциация параметров по регионам исходя из экологических соображений. Слабые места этой системы очевидны. Прежде всего, критике подвергается использование ПДК в силу недостаточной точности, более того – достоверности этих показателей; произвала вместо научного обоснования в процедурах их определения более чем достаточно. Очень ненадёжны, слабо обоснованы процедуры расчёта ПДВ. Эти слабые места – следствие попытки определять платёжи за негативное воздействие на природу, взяв за отправную точку природные системы, их реальное состояние, их реакцию

на воздействия. Но природные системы слишком сложно устроены, отсюда все грехи рассматриваемого подхода.

Технические системы устроены несопоставимо проще, чем природные, именно это стоит за намерением заменить принцип ПДК на принцип НДТ при определении платежей за негативное воздействие на окружающую среду и, в частности, на водные объекты. Не от природы с её «требованиями» к предприятию, а от предприятия с доступными ему возможностями – к природе. Это радикальное изменение точки зрения вполне можно считать антиэкологичным, но, в конце концов, дело не столько в идее, сколько в её реализации. Принцип НДТ состоит в том, что загрязнитель платит за загрязнение только в том случае, если его уровень превышает тот, который обеспечивается наилучшей из доступных ему технологий того же назначения. Справочники и реестры НДТ с их экологическими характеристиками становятся главной частью информационной базы определения экологических платежей. Неясностей и неоднозначностей и здесь хватает, может быть, не меньше, чем в предыдущем случае. Невозможно точно определить, что такая доступная технология. Экологических параметров технологии может быть несколько: например, содержание солей разных тяжёлых металлов. Придётся сравнивать не только технологии, но и загрязняющие вещества по степени их опасности; именно затруднения с решением этой задачи – одна из причин критики подхода на основе ПДК.

Как будет организована система платежей по принципу НДТ за негативное воздействие на окружающую среду в России пока во многом неясно. В прежней системе выбросы, по объёму не превосходящие НДВ, благополучно облагались платежами (именно такие платежи составляли основную часть поступлений по данному виду сборов), хотя этот порядок многократно подвергался критике со стороны самых разнообразных лоббистов: мол, если норматив воздействия не превышен, то за что платить-то? Но плата источника сбросов загрязнённых вод за негативное воздействие на окружающую среду – это не мера по охране одного отдельно взятого пруда. Это – лишь малая часть системы мер по защите биосфера. Суммарное воздействие цивилизации на биосферу по оценкам, полученным согласно разным методикам [19, 20], уже более ста лет превышает допустимый объём (несущую ёмкость биосферы) и продолжает

взрастать, что обуславливает углубление глобального экологического кризиса; оно проявляется в непрерывном ухудшении значений практически всех глобальных экологических характеристик (точнее, всех за исключением концентрации озона в озоновом слое, которая перестала снижаться после выполнения всеми странами требований Монреальского протокола по озоноразрушающим веществам). Именно из-за глобального характера экологического кризиса платить надо за любые негативные воздействия на окружающую среду, поскольку биосфера уже не в состоянии нейтрализовать всю совокупность таких воздействий, исходящих от современной цивилизации.

Распространена наивная вера в то, что благодаря изменениям в природоохранительном законодательстве, определившем ориентацию именно на такой принцип, НДТ, как по мановению волшебной палочки, будут активно (или, хотя бы, активнее, чем до сих пор) внедряться в практику. Удивительно, сколько по этому поводу написано откровенной чепухи – к счастью, не в научных изданиях. Увы, нет: никакие справочники и реестры НДТ не будут способствовать их внедрению в материальное производство, их единственная роль сводится пока к использованию при расчёте платы за негативное воздействие на окружающую среду. Для внедрения самих НДТ в производство, а не их перечней в практику начисления экологических платежей, нужны не перечни, а заинтересованность предприятий в природоохранных мерах и наличие у них финансовых и прочих возможностей для её материализации. Изменение системы экологических платежей может способствовать возбуждению такой заинтересованности, но главное здесь – не выбор между ПДК и НДТ, а размер базовых ставок и прочих параметров системы.

В 1990-е гг. 90% от сбора экологических платежей поступали в экологические фонды<sup>8</sup> [21], платежи за водопользование – в водные фонды. С момента организации последних в 1996 г. между экологами и водохозяйственниками шёл непрерывный спор о том, куда должны направляться платежи за негативное воздействие на водные объекты: в экологические или в водные фонды. Это были целевые бюджетные фонды, самостоятельные финансовые организации, средства

<sup>8</sup> В системе экологических фондов было три уровня: федеральный, региональный (так называемый «субъектовый»), местный (муниципальный)

которых могли быть потрачены только на экологические и, соответственно, водоохраные и водохозяйственные цели, ни в коем случае не на зарплату или премии и т.п. персоналу экологических, водоресурсных и водохозяйственных органов.

Прежде чем этот спор разрешился, и те и другие фонды были ликвидированы. Руководство Минфина настояло на том, что соответствующие платежи должны направляться прямо в консолидированный государственный бюджет (та же участь постигла, за тремя исключениями, и все остальные целевые бюджетные фонды). Логика этого решения была очень простая: Минфин лучше знает, как распределять бюджетные средства между различными направлениями их использования. Если бы это было действительно так...

Работники водоресурсных, водохозяйственных и экологических служб были заинтересованы в высокой собираемости платежей, поступавших в водные и экологические фонды. Казалось бы, такая заинтересованность может возникать только в случае, если персонал что-то получает из фондов, но ведь это было запрещено законом! Действительно, за все 1990-е гг. не было выявлено ни одного случая «запускания рук» в карман фондов (нечелевое использование несколько раз обнаруживалось, но не ради собственной выгоды, а для каких-либо местных нужд, на финансирование которых не находилось средств в местных бюджетах). Что же было причиной отмеченной заинтересованности? Ответ простой: средства фондов в значительной степени тратились на оснащение экологических и водных служб приборами, компьютерами, транспортом, что улучшало условия труда, поднимало его результативность, требовало повышения квалификации персонала. В результате именно экологические платежи характеризовались самой высокой собираемостью среди всех налогов и сборов – более 90%.

При действующих ставках платежей ни водные, ни экологические сборы не могут обеспечить в полной мере финансирование соответствующих органов управления. Однако в перспективе (к сожалению, далёкой) ситуация должна измениться на противоположную: такие сборы должны перекрывать затраты на содержание этих органов и пополнять бюджет. Такая ситуация будет свидетельствовать об адекватной оценке обществом как значимости водных

ресурсов, так и экологического ущерба, наносимого негативными воздействиями на окружающую среду.

### **Субсидии как способ выполнения социальных ограничений**

Социальные ограничения в управлении водными ресурсами и водным хозяйством возникают, когда сложившаяся ценовая конъюнктура 1) не оставляет каким-либо социальным группам возможности удовлетворять потребности в воде и услугах водного хозяйства по объёму и качеству, которые государству представляются необходимыми, 2) не даёт возможности развиваться или хотя бы функционировать видам деятельности, которые государству представляются безусловно целесообразными. Основной экономический способ учёта социальных ограничений – субсидии таким группам населения и предприятиям (организациям), занимающимся соответствующими видами деятельности. Вопрос в том, какие требования следует налагать на субсидии. Во-первых, они не должны наносить никакого ущерба тем экономическим агентам, которые, собственно, и обеспечивают своей производственной деятельностью удовлетворение соответствующих потребностей (например, субсидии потребителям воды не должны осуществляться за счёт водоканалов). Во-вторых, валовой объём субсидии для её получателя (неважно, прямым или косвенным способом осуществляется это получение) должен зависеть от объёма его деятельности (объёма потребления субсидируемого ресурса). В-третьих, удельный объём субсидии для её получателя должен зависеть от качества его деятельности (например, удельная субсидия растениеводу – скажем, в расчёте на единицу продукции – тем больше, чем меньше он затрачивает воды на производство этой единицы). В-четвёртых, удельный объём субсидии должен зависеть от социальной значимости причины субсидирования.

Из перечисленных четырёх требований в российской системе управления водопользованием выполнено только второе, здесь всё очевидно, и если не озабочиваться остальными требованиями, особых проблем с механизмом субсидирования не возникает. Они возникают при внедрении такого одногоного (вместо четырёх опор) механизма в практику. Невыполнение первого требования извращает саму идею субсидирования; надеясь, что система без его

выполнения будет удовлетворительно функционировать, можно только при уверенности в том, что любые возникающие осложнения разрешит обком. Третье требование препятствует превращению субсидиарной системы в кормушку для паразитов, способы выполнить его разнообразны, их выбор зависит от конкретных условий. Четвёртое условие, к сожалению, трудно квантифицировать, оно апеллирует к выявлению общественных предпочтений и их количественной оценке или хотя бы упорядочению по значимости – задаче, которая даже в государствах с развитым гражданским обществом приемлемо решается не так уж часто, и тем чаще, чем меньше масштаб социума, который её поставил (например кантон в Швейцарии или муниципалитет в Швеции).

Система субсидий в СССР складывалась стихийно, как систему её никогда не рассматривали; конечно, беспокоились о том, чтобы своевременно уловить социальные напряжения и смягчить их у становлением субсидий, но далее следовали согласование с Минфином (если оно требовалось) и надежда на то, что обкомы и пр. всё расставят на свои места. Российская Федерация унаследовала советскую систему субсидий и советское же бессистемное отношение к ней. Обкомов теперь нет, хотя Народный фронт иной раз и пытается имитировать их деятельность в некоторых аспектах, а рынок ничего не может «расставить по своим местам» из того, что связано с проблематикой субсидий. Проблему субсидий – вообще и в водопользовании в частности – должно решать государство вместе с гражданским обществом, чем быстрее, серьёзнее и ответственнее они этим займутся, тем больше шансов на успех в приемлемые сроки и с некатастрофическими потерями.

\* \* \*

Для практики управления водными ресурсами и водным хозяйством экономическая наука может, помимо разработки понятийного аппарата, предложить лишь отдельные инструменты, прежде всего – экономико-математические модели со специфической гидрологической и водохозяйственной «начинкой», которые должны помочь работникам системы управления в реализуемых ими процессах подготовки и принятия решений.

В силу всех изложенных причин эти решения не могут быть оптимальными. С почти 100-процентной вероятностью они будут нуждаться в корректировке в процессе реализации. Для такой корректировки, естественно, понадобятся те же инструменты, которые использовались при подготовке решений. Главное, однако, не в инструментах. Необходима обратная связь системы управления с управляемым объектом. Необходима система мониторинга реализации управленческих решений. Необходимы быстрые реакции на выявляемые несоответствия целей принятых решений практике их реализации. Это – азбучные кибернетические истины. Нынешняя неповоротливая, коррумпированная система управления российской экономикой этим требованиям, очевидно, не соответствует. Очевидно также, что существенно изменить её к лучшему в одной, отдельно взятой отрасли, к тому же самой сложной с точки зрения возникающих в ней задач управления, не удастся. Тем не менее гидрология и водохозяйственная наука хотя бы ради создания задела для будущего должны, не ослабляя усилий, заниматься этими задачами и бороться за внедрение получаемых результатов в практику.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ольшевский [И.]. Бюрократія. М.: Изд-во В.М. Саблина, 1906. – VIII, 417 с.
2. Crozier M. The Bureaucratic Phenomenon. Chicago: University of Chicago Press, 1963. – 342 р.
3. Гудков А., Левада Ю., Левинсон Ф., Седов Л. Бюрократизм и бюрократия: необходимость уточнений // Государство и право. – 2004. №1. – С. 45–57.
4. <http://rulaws.ru/Vodnyy-kodeks/>
5. <http://base.garant.ru/10108700/>
6. Акутагава Рюноскэ. Сочинения. В 4 т. Т. 3. М.: Полярис, 1998. – 447 с.
7. Юнг К.Г. Архетип и символ. М.: Канон+, 2015. – 336 с.
8. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М.: Научный мир, 2010. – 232 с.
9. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты. М.: Наука, 2006. – 221 с.
10. Малышев Б.С. Общая теория ренты. Томск: ФЖ ТГУ, 2012. – 196 с.

11. Яковец Ю.В. Рента, антирента, квазирента в глобально-цивилизационном измерении. М.: Академкнига, 2003. – 240 с.
12. Ушаков Е.П. Рентные отношения водопользования в России. Серия: Экономическая наука современной России. М.: Наука, 2008. – 303 с.
13. Данилов-Данильян В.И. Природная рента и управление использованием природных ресурсов // Экономика и математические методы. 2004. Т. 40, №3. – С. 3–15.
14. Бобылёв С.Н., Минаков В.С., Соловьёва С.В., Третьяков В.В. Эколого-экономический индекс регионов РФ. М.: WWF России; РИА Новости, 2012. – 152 с.
15. [Ohttp://studopedia.ru/10\\_33541\\_skorrektilovannie-istinnie-chistie-sberezheniya-istinnie-sberezheniya.html](http://studopedia.ru/10_33541_skorrektilovannie-istinnie-chistie-sberezheniya-istinnie-sberezheniya.html)
16. Данилов-Данильян В.И., Рывкин А.А. Некоторые методологические проблемы экономики научно-технического прогресса // Экономика и математические методы. 1984. Т. 20. Вып. 6. – С. 1084–1102.
17. Пигу А. Экономическая теория благосостояния. В 2 т. Серия: Экономическая мысль Запада / Пер. с англ. М.: Прогресс, 1985. – 512, 456 с.
18. Данилов-Данильян В.И. Теорема Коуза: попытка диагноза // Вестник РАН. 2012. Т. 82. № 9. – С. 814–822.
19. Горшков В.Г. Структура биосферных потоков энергии // Ботанический журнал. 1980. 65. №11. – С. 1579–1590.
20. Vitousek P.M., Erlich P.R., Erlich A.H.E., Matson P.A. Human appropriation of the products of photosynthesis // Bioscience. 1986. 36. – Р. 285–301.
21. Аверченков А.А. и др. Экологические фонды: теория и практика. М.: Радио и связь, 1995. – 208 с.

# **Водопользование в условиях неопределенности**

*В.И. Данилов-Данильян, И.Л. Хранович*

## **Проблема**

Посредниками между природными объектами и водопользователями выступают водохозяйственные системы (ВХС), объединяющие средства получения, перераспределения, очистки и доставки водных ресурсов, согласуя потребности производства и общества в водных ресурсах с возможностью их удовлетворения. Стратегии развития ВХС взаимосвязаны со стратегиями развития претендентов на водные ресурсы –водопользователей. Трансформации структур, параметров и режимов функционирования ВХС предопределяются запросами пользователей на водные ресурсы и сброс сточных вод. Пользователи формируют свои запросы, ориентируясь на предполагаемые возможности ВХС. Как правило, совокупность запросов пользователей, конкурирующих за воду и за право сброса сточных вод, значительно превосходит возможности их удовлетворения. Возникает проблема выработки согласованных стратегий развития и функционирования ВХС и пользователей, в решении которой целесообразно участие как тех, кто преобразует природную воду в товар, производит водохозяйственные услуги и т.п. – ВХС, так и тех, кому необходимы вода и эти услуги – водопользователей.

ВХС являются элементами инфраструктуры по обеспечению водными ресурсами производства и населения. Для обеспечения устойчивого развития водоёмных отраслей, удовлетворения потребностей населения в воде и услугах водного хозяйства, сохранения экологически приемлемой среды обитания требуется опережающее развитие ВХС, которые представляют собой сложные природно-технические комплексы, проектирование, строительство и реконструкция которых требуют значительных затрат труда, капитальныхложений и времени. Соответствующие этому стратегии развития ВХС в увязке со стратегиями развития пользователей, которые также являются сложными системами, должны охватывать достаточно длительный расчетный период. Такие стратегии приходится вырабатывать в условиях значительной неопределенности структуры, форм и масштабов водопользования, обусловленной научно-техническим прогрессом и коренным преобразованием всей систем-

мы хозяйствования. Необходимость рассмотрения функционирования и развития ВХС в неопределённых условиях обусловлена также возрастающей антропогенной нагрузкой на природные объекты, при которой возможны необратимые экологические последствия. В частности, с развитием водоёмских производств, при котором возрастают объёмы используемых водных ресурсов, увеличиваются массы сбросных вод. Неопределенность условий функционирования и развития ВХС проявляется также в изменении отношения общества к влиянию хозяйственной деятельности на природные объекты. С ростом благосостояния и уровня образования повышаются требования к качеству окружающей среды. Общество все больше поворачивается лицом к природе, в связи с этим меняются оценки ВХС как природно-технических систем. Значительная неопределенность условий развития и функционирования ВХС обусловлена также возможными изменениями характеристик водных ресурсов, которые могут существенно трансформироваться, например, в связи с возможными изменениями климата. Наряду с неопределенностями условий развития и функционирования ВХС, обусловленные внешними заранее неизвестными обстоятельствами, присутствуют внутренние неопределенности из-за неизвестности поведенческих стратегий конкурентов – пользователей, претендующих на общие водные ресурсы.

Неопределенности условий, в которых могут оказаться ВХС в будущем, порождают трудности планирования, связанные с необходимостью принятия детерминированных решений о параметрах ВХС и режимах их функционирования. Эти условия зарождают риск снижения эффективности использования водных ресурсов из-за возможного несоответствия принятых управляющих решений реальным условиям, в которых приходится осуществлять такие решения.

### **Гарантированное водопользование**

Для формирования согласованных стратегий пользователей, претендующих на общие водные ресурсы в неопределенных условиях, естественно обратиться к подходу, принятому в теории управления ВХС [10]. На пути снижения риска в управлении водным хозяйством в стохастических условиях, вызванных внешними зара-

нее неизвестными обстоятельствами, возникли понятия располагаемый водный ресурс [23], гарантированная отдача (гарантированное водопользование) [16], гарантированное качество водных ресурсов [2] и их надёжности. Располагаемый водный ресурс – ориентировочное количество водного ресурса, его надёжность – вероятность того, что этого ресурса будет не меньше. Гарантированное водопользование, выполняющее функцию ориентировочного планового показателя, является расчётым количеством (расходов и/или объёмов) водных ресурсов, предоставляемых пользователю; его надёжность – вероятность того, что фактическое поступление водных ресурсов не меньше гарантированного. Гарантированное качество водных ресурсов характеризуется совокупностью расчётым качественных характеристик воды в водоёмах, предоставляемой пользователям и отводимых ими; его надёжность определяется вероятностью того, что действительное качество водных ресурсов не хуже гарантированного по всем показателям качества.

В любой хозяйственной деятельности водные ресурсы используются в комплексе с другими ресурсами, расход которых зависит от режима и качества водных ресурсов, не только тех, которые присутствуют в хозяйственной системе, но и тех, в расчете на которые строились её планы в стохастических условиях. Это – разные величины. Если водные ресурсы – один из критических факторов (и даже главный критический фактор, как в орошаемом земледелии), то все процессы планирования и управления деятельностью организаций-водопользователей в качестве важного входного параметра используют данные о том количестве и качестве этих ресурсов, на которые можно ориентироваться при принятии решений. Именно для этого применяются показатели гарантированного водопользования и гарантированного качества. Показатели гарантированных режимов и гарантированного качества водных ресурсов определяют не только проведение необходимых подготовительных работ и использование других ресурсов, но и планируемые результаты – количество вырабатываемой продукции (в том числе транспортных и рекреационных услуг), предотвращённый ущерб от наводнений и т.п. Отклонение реализуемых режимов и качества водных ресурсов от гарантированных показателей приводит к необходимости коррек-

тировки принятых решений и компенсации связанных с этим потерь – дополнительных затрат, упущенной прибыли и т.д.

Подготовка полей к орошению включает ремонт и «настройку» оросительной сети, закупку новой и/или ремонт имеющейся техники, выбор структуры посевов с организацией необходимого обеспечения и другие работы, она проводится до того, как состоялась конкретная реализация стохастических условий поступления водных ресурсов, в расчёте на их использование в объёме гарантированных значений и при гарантированном качестве. Поступление воды в объёме меньше гарантированного означает недополив при орошении и, следовательно, уменьшение урожайности, а также делает лишними часть подготовительных работ. Использование водных ресурсов сверх гарантированного значения не всегда возможно. Если оросительная сеть и состав сельскохозяйственных культур такую возможность допускают, то включение дополнительной техники, персонала и организация дополнительных работ осуществляются со значительно меньшей отдачей, чем использование объёма водных ресурсов, на который была ориентирована оросительная система.

Показатели гарантированного водопользования и гарантированного качества водных ресурсов, которые характеризуют возможности ВХС как партнера в хозяйственной деятельности, полностью переносятся на более общие условия неопределённости, которая с привлечением субъективно вероятностной трактовки трансформируется в стохастичность. Информация о ситуациях в будущем является неопределенной, она либо обладает, либо не обладает стохастической устойчивостью. Неопределённые условия, о которых удалось получить данные наблюдений, достаточные для применения объективно-вероятностного подхода, рассматриваются как объективно стохастические. Если же непосредственное использование данных прошлых наблюдений недостаточно, чтобы выявлять закономерности поступления и использования ресурсов, на помощь приходит субъективно вероятностный подход, основанный на экспертных оценках различных возможных природных ситуаций и условий хозяйственной деятельности. Будучи нормированы, эти оценки обладают всеми свойствами вероятностей: они неотрицательны, их сумма равна единице, оценка значимости совокупности

возможных условий равна сумме оценок значимостей условий, входящих в эту совокупность. Субъективные и объективные вероятности совместно включаются в комплекс оценок возможных ситуаций функционирования и развития систем в «стохастических» условиях.

Заметим, что термин «гарантированное водопользование» не вполне соответствует содержанию обозначаемого им понятия. На самом деле в рассматриваемых ситуациях никаких гарантий в системе централизованной плановой экономики, когда он был введён, не предполагалось. В случае отклонения текущих значений водопользования от гарантированных в нежелательную для потребителя сторону он не получал никаких компенсаций – ни непосредственно от государства, ни от его представителя – ВХС. Термин «гарантия» даже в советской экономике использовался применительно к ситуациям, когда производитель продукции в случае обнаружения её несоответствия нормативному качеству в течение гарантийного срока заменяет либо ремонтирует её, в крайнем случае, компенсирует потребителю его издержки, т.е. – в конечном счёте – выполняет своё обязательство перед ним. Ничего подобного гарантийное водопользование не предусматривало, да это и в принципе невозможно в данном случае, если не прибегать к чрезмерно расширительным трактовкам понятия «гарантия». Ещё менее соответствует концепция гарантированного водопользования механизмам гарантирования в рыночной системе. Представляется, что в соответствии с их реальным смыслом показатели гарантированного водопользования правильно назвать ориентирами: это те объёмные, режимные и качественные характеристики водных ресурсов, на которые водопользователи ориентируются при составлении планов своей деятельности, с которыми согласовываются показатели потребления всех прочих ресурсов и организационные мероприятия. Несмотря на неадекватность традиционной терминологии, в дальнейшем она иногда используется, наряду с понятием «ориентир».

### **Производственные функции**

Принятие подхода, в котором возможные условия хозяйствования и их субъективные вероятности отражают накопленный опыт и знания экспертов, даёт возможность перенести методологию гарантированного водопользования и его надёжности на построение про-

изводственных функций, оценивающих результаты использования ресурсов в условиях неопределённости. Значения этих функций зависят от двух групп переменных, соответствующих реально используемым в хозяйственной деятельности ресурсам и их предполагаемым значениям – ориентирам [12]. Реальные переменные могут принимать различные значения при различных реализациях стохастических условий функционирования ВХС. С ориентировочными количествами используемых ресурсов связано планирование необходимых подготовительных работ и других ресурсов, не учтываемых явно при оценке результатов производства. Значения виртуальных переменных, соответствующих ориентирам, одни и те же при всех реализациях стохастических условий. Отклонения реализуемых количеств водных ресурсов и масс содержащихся в них примесей от ориентиров приводят к необходимости корректировки принятых решений и потерям в результатах хозяйственной деятельности.

Производственные функции, оценивающие результаты использования ресурсов, представимы в виде сумм двух функций, одна из которых характеризует результат использования ресурсов в объёме, равном ориентиру, другая описывает потери результата, обусловленные отклонениями объёмов используемых ресурсов от их ориентировочных величин. Под функцией, оценивающей потери результата, её называют функцией ущербов, понимается математическое ожидание ущербов, обусловленных функционированием потребителей ресурсов в различных стохастических условиях. При использовании ресурсов в объёме, равном величине ориентира, нет необходимости в коррекции запланированного решения, функция ущербов равна нулю. В режиме использования избытоков ресурсов, утилизация дополнительных ресурсов возможна только при наличии потребности в них и условий для её удовлетворения. Например, речной транспорт может использовать избыточные глубины только при наличии судов с большой осадкой и дополнительных грузов, которые необходимо перевезти. Использование избыточных ресурсов осуществляется со значительно меньшей эффективностью, чем предполагаемых (т.е. при дополнительном значении того же объёма ориентира). Использование ресурсов при их дефиците характеризуется увеличением стоимости вырабатываемой продукции, а при

превышении дефицитом некоторого предела – невозможностью её производить. Дополнительные затраты на поддержание данного уровня производства (в первом случае) и компенсации потерь от недодачи продукции (во втором) значительно превосходят эффект от использования предполагаемых объёмов ресурсов. Это означает, что при дефиците ресурсов функции ущербов отрицательны и их значения резко убывают с ростом дефицита. Таким образом, результат использования ресурсов в ориентировочных объёмах (это – «идеальные» условия) выше результата использования ресурсов в тех же объёмах, которые получаются в реальных стохастических условиях, когда поставляемые объёмы отклоняются от ориентиров. Целесообразность включения ориентировочных величин используемых ресурсов в оценку результатов функционирования производства определяется также тем, что результат использования дополнительных ресурсов не превосходит результата использования того же ориентированного количества (как правило меньше), а снижение результата производства при непредусмотренном дефиците ресурсов не меньше (как правило значительно больше), чем то, которое является следствием уменьшения ориентированной величины ресурса.

Производственные функции, зависящие от показателей водных ресурсов в различных стохастических условиях и их ориентировочных значений, предоставляют возможность в явном виде представить риск снижения результата деятельности вследствие неполного (в сравнении с ориентиром) обеспечения ресурсами и шанс повышения результата, обусловленный получением дополнительного (относительно ориентира) количества ресурсов. Под риском в данной работе понимается математическое ожидание потери результата из-за получения ресурсов в количестве, меньшем ориентированного. В соответствии с этим риск определяется через описанную производственную функцию как математические ожидание значений функции ущербов от недополучения ресурсов в различных исходах стохастических условий. Шанс представляет собой математическое ожидание увеличения результата деятельности вследствие использования дополнительного количества ресурсов и также выражается через введённую производственную функцию как математические ожидание значений функции ущербов от прироста резуль-

татов при реализации исходов стохастических условий, в которых значение получаемого ресурса превосходит величину его ориентира. Из определений риска и шанса следует, что производственную функцию можно представить в виде суммы функций, слагаемые которой: функция, оценивающая результат использования ресурсов в объёме, равном ориентиру, риск и шанс.

Производственные функции, зависящие от показателей водных ресурсов в различных стохастических условиях и их ориентировочных значений, предоставляют возможность при согласовании стратегий водопользования оценивать надёжность ориентировочного количества ресурсов. Она определяется в виде сумм вероятностей событий, в которых объёмы предоставляемых ресурсов не меньше их ориентировочных величин [12].

### **Подход к согласованию интересов конкурирующих субъектов**

В поисках методологических основ создания механизмов разрешения конфликтных ситуаций водопользования естественно обращаться к известным подходам согласования интересов конкурентов, претендующих на общий ресурс. Структурой, в рамках которой происходит согласование интересов пользователей, видится рынок, выполняющий роль экономического регулятора.

Весьма привлекателен механизм взаимодействия участников рынка в условиях совершенной конкуренции, характеризующейся незначительным воздействием отдельных элементов на общие для всей системы показатели управления. В этом случае пользователи могут выбирать стратегии, руководствуясь своими интересами, независимо от поведения других участников. Для того, чтобы такой рынок состоялся, должна быть выполнена совокупность предпосылок:

- стихийное установление цен в процессе свободной конкуренции, когда ни один из участников не обладает достаточной долей ресурса или спроса, чтобы влиять на его цену.
- отсутствуют ограничения, препятствующие совершению сделок между любым покупателем и любым продавцом;
- отсутствуют факторы, кроме предложения ресурса и спроса на него, влияющие на установление цены;

- нет ограничений для появления новых участников рынка и ухода с него уже действующих;
- участники рынка обладают полной информацией, необходимой для выбора партнёров сделок и принятия решений о сделках;
- поведение участников рынка является рациональным (объяснимым собственными экономическими интересами);
- затраты на проведение сделок пренебрежимо малы.

В действительности такое идеализированное взаимодействие продавцов и покупателей, как правило, отсутствует. Типичным является рынок несовершенной конкуренции, в котором участники сделок могут влиять на цены продукции и пользователям приходится ориентироваться на предполагаемые стратегии поведения других участников. Влияние отдельных продавцов и покупателей на цены, устанавливаемые на рынке, особенно значимо проявляется в системах, включающих небольшое число участников. Показательным примером рынка несовершенной конкуренции являются трансграничные водохозяйственные системы. В них небольшое число пользователей, претендующих на водные ресурсы трансграничного водного объекта, могут влиять на показатели управления, общие для всей системы, в частности, на цены за воду и иные услуги водного хозяйства (водоотведение и пр.).

Ситуация несовершенной конкуренции (олигополия/олигопсония) заставляет пользователей ориентироваться на предполагаемые стратегии поведения других участников. Общая теория несовершенной конкуренции отсутствует. Рассматриваются отдельные модели-схемы поведенческих ситуаций. В модели олигополии Курно фирмы конкурируют, выбирая объёмы производства, цены устанавливает рынок [22]. В модели Бертранда фирмы назначают цены, оставляя рынку возможность определять объёмы производимой продукции [21]. В модели Штакельберга предполагается существование ведущей фирмы, которая первой устанавливает объём своего производства, остальные фирмы ориентируются на неё [25]. Набор предполагаемых стратегий поведения конкурентов непредсказуем. Это означает, что согласование интересов участников рынка с использованием отдельных моделей – схем конкурентного поведения (или их комбинаций) более чем проблематично.

Для создания механизмов согласования интересов водопользователей неизбежным стало обращение к теоретико-игровому подходу, ориентированному на анализ конфликтных ситуаций, где каждая из сторон активна и имеет возможности индивидуального выбора, от которого зависит не только её собственный конечный результат, но и результаты других участников. Продуктивным явилось рассмотрение игр с двухуровневой структурой разрешения конфликтных ситуаций, которая отражает особенности взаимодействия ВХС, представляющей верхний уровень, и пользователей, образующих нижний уровень [11]. На возможности, заложенные в таких конфигурациях для формирования механизмов согласования интересов конфликтующих субъектов, впервые обратил внимание Г. Штаккельберг [25], который предложил из конкурирующих производителей выделить ведущую фирму, устанавливающую объём своего производства первой. Остальные фирмы ориентируются на неё (цели, отражающие коллективные блага, не предполагались). Цели, общие для всех конкурентов, появились в работах по моделям оптимального перспективного планирования [1], теории активных систем [3, 4] и в теории игр с непротивоположными интересами [5, 8, 9]. Цель, общая для всех игроков, рассматривается как цель управляющего органа – центра, представляющего собой верхний уровень системы. Нижний уровень образуют элементы этой системы – игроки. (В теории игр с непротивоположными интересами такая структура явно организационно не выделяется, хотя фактически подразумевается). В производстве продукции (понимаемой в широком смысле) центр обычно непосредственного участия не принимает. Он влияет на выбор элементами своих стратегий назначением показателей, которыми оценивается качество их функционирования, либо через какие-либо иные параметры.

В ситуациях конкурентного согласования интересов участники прилагают усилия для обеспечения себе условий наилучшего использования ресурсов. При этом они стремятся минимизировать свой риск и не упустить свой шанс, возникающие из-за неопределенности, порождаемой внешними обстоятельствами и неизвестностью относительно действий других активных участников. Однако во всех моделях согласования, описывающих как совершенную, так и несовершенную конкуренцию, риск и шанс в явном виде не пред-

ставлены. Начиная с работ Курно и Бертрана, в моделях согласования незримо присутствует концепция «вначале требуется разработать механизмы разрешения конфликтов в детерминированных условиях, а затем можно будет переходить к более общим ситуациям, в частности, к согласованию интересов в условиях неопределенности, обусловленной внешними заранее неизвестными обстоятельствами». Этот принцип «от простого к сложному» вошёл в противоречие с необходимостью учёта всех существенных факторов исследуемого процесса. Водные объекты функционируют в стохастических условиях поступления и использования водных ресурсов. В рамках детерминистского подхода невозможно формализованное адекватное представление рисков и шансов и, следовательно, нереально ожидать появления «общей теории» согласования интересов конкурирующих субъектов.

Ситуация с согласованием интересов конкурирующих субъектов, в которой они могли бы вырабатывать приемлемые стратегии, представлялась безвыходной. Однако на основе принятых в теории управлении водными ресурсами в стохастических условиях понятий гарантированных водопользования и его надёжности выявились возможность разработать подход и реализующие его механизмы к согласованию интересов пользователей, претендующих на общие ресурсы, представляющие собой выход из этой тупиковой ситуации. Развиваемый подход свободен от необходимости каждому участнику ориентироваться на предполагаемые стратегии поведения партнёров в условиях несовершенной конкуренции соперничества пользователей водного объекта. Согласование интересов конкурентов – водопользователей основывается на методологии активных систем, принципе открытого управления и учёте особенностей поступления и результативности использования водных ресурсов. Центральное место занимают зависимости результатов водопользования (производственные функции) как от используемых в различных стохастических условиях объёмов водных ресурсов и содержащихся в них масс примесей, так и от их ориентиров (так называемых гарантированных значений этих показателей). Базовые математические модели, используемые в согласовании интересов пользователей ресурсов водных объектов, основаны на естественном представлении ВХС виде сети с потоками, соответствующими потокам воды

и примесей. В этих моделях в явном виде присутствуют риски, шансы и надёжности гарантированного водопользования [14].

Предлагаемые механизмы согласования интересов пользователей, претендующих на ресурсы водных объектов, рассматриваются в двух возможных ситуациях разработки стратегий использования этих ресурсов:

- соглашение об использовании водного объекта либо отсутствует, либо заключено между частью водопользователей этого объекта;
- такое соглашение существует, требуется его пересмотр.

Согласование интересов пользователей, объединённых в ВХС водохозяйственной сетью и общностью используемых ресурсов, осуществляется в стохастических условиях с учётом количественных и качественных показателей водных ресурсов, как в статической постановке, так и в динамической постановке с дискретным временем.

Рассматриваются ситуации функционирования, выбора параметров и развития ВХС. При рассмотрении проблемы функционирования предполагаются известными: структура ВХС, параметры элементов и их характеристики, а также физические условия, технические, экономические, экологические и социальные требования, предъявляемые к ВХС как составной части хозяйства и элементу окружающей среды. При выборе параметров, наряду с существующими структурой, параметрами и характеристиками ВХС, предполагаются известными также избыточный набор реконструируемых и вновь строящихся элементов с их возможными параметрами и характеристиками. В проблеме выбора параметров каждому варианту развития элемента соответствует свой момент ввода, этапность изменения параметров не учитывается. Проблема развития ВХС отличается от проблемы выбора параметров учётом в ней этапности ввода вариантов, предполагающей возможность изменения параметров элементов и технологии использования водных ресурсов во времени [13, 14].

### **Структура согласования**

Формирование компромиссных стратегий использования общих ресурсов, на которые претендуют конкурирующие субъекты, происходит в организационных структурах (центрах), в рамках которых происходит согласование интересов пользователей. Для реализации

выработанных стратегий решения центра обязательны для всех участников, делегирующих центру полномочия в разрешении конфликтных ситуаций. В частности, разрешение конфликтных ситуаций, связанных с использованием трансграничных водных объектов, происходит в образуемых трансграничными государствами межгосударственных центрах таких, как Дунайская, Рейнская, Индская комиссиях. Центр, согласующий интересы использования ресурсов внутригосударственных водных объектов «самостоятельными» пользователями, представлен государственными организациями.

Интересы центров отражают коллективные интересы пользователей, стремящихся разрешить конфликтные ситуации, обусловленные общностью используемых ресурсов. Поэтому процедуры формирования согласованных стратегий использования ресурсов, проводимые в центрах, принципиально могут быть только открытыми. Основа этих процедур – принцип открытого управления (честной игры), предполагающий активное участие центра и претендующих на общие ресурсы участников в формировании согласованных стратегий, способствует выработке компромиссных решений и их осуществимости. Это означает, что центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений, а пользователи знают возможные стратегии и принципы стимулирования принимаемых решений.

Формирование механизмов согласования интересов пользователей в данной работе основывается на теории активных систем и реализует принцип открытого управления. Пользователи и центр образуют активную двухуровневую систему, в которой центр – верхний уровень; пользователи образуют нижний уровень. Центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений. Пользователи – активные элементы знают возможные стратегии и принципы стимулирования принимаемых решений. Они реализуют собственные предпочтения, целенаправленно манипулируя информацией о своих возможностях, целях и эффективностях. Компромиссные стратегии пользователейрабатываются в рамках базовой задачи, формируемой центром с использованием функций предпочтений, сообщаемых элементами. Центр влияет на эффективность функционирования элементов выделением ресурсов и назначением их цен, которые определяются в результате

решения базовых задач. Элементы стремятся максимизировать показатели эффективности, связанные с их функционированием. Центр максимизирует функцию, которой оценивается эффективность функционирования всей системы. Он добивается согласованности, при которой элементы, преследуя собственные цели, реализуют состояния, обеспечивающие достижение целей системы.

Рассматриваются три варианта формирования соглашений об использовании водного объекта и соответствующие им базовые задачи: рациональное использование водных ресурсов (без явного учёта их качества), управление качеством водных ресурсов (в предположении, что их количественные показатели фиксированы) и совместное управление количеством и качеством водных ресурсов. В рамках каждого из вариантов рассматриваются три подварианта. В одном согласование интересов происходит при фиксированных параметрах водопользователей, в другом – не только согласуются интересы элементов, но и выбираются их параметры, в третьем – допускается возможность изменения параметров во времени.

Пересмотр соглашений об использовании водных ресурсов и сбросе сточных вод осуществляется в рамках управляемого центром рынка воды и услуг по водоотведению, функционирующего в стохастических условиях.

Предложенные механизмы разрешения конфликтных ситуаций водопользования, с различной полнотой и подробностью учитывающие особенности эксплуатации водных ресурсов и управления их качеством, объединяются в комплекс, в котором с использованием математических моделей последовательно уточняющих решения, стратегии сравниваются, отбраковываются и выбираются рациональные [14].

### **Базовые задачи**

Формирование согласованных стратегий пользователей, претендующих на водные ресурсы и связанные с ними услуги ВХС, сначала рассматриваются в статической постановке.

Центр – метаигрок с правом первого хода, управляет согласованием интересов водопользователей, распределяя водные ресурсы и массы примесей, а также назначая за них цены, которые определяются в рамках базовой задачи. Он проводит встречный способ планирования и реализует механизм открытого управления, тем самым

влияет на выбор игроками нижнего уровня – пользователями своих состояний. Каждый цикл планирования состоит из четырёх этапов. На первом этапе элементы сообщают в центр свои функции предпочтения. На втором – центр на основании полученных функций предпочтения определяет план системы. На третьем этапе элементы выбирают свои состояния. На четвёртом – определяются достигнутые значения целевых функций элементов и всей системы. Механизм управления предполагается постоянным. Его изменение требует существенных материальных, временных, трудовых, социально-психологических и других затрат.

Инструментами управления являются объёмы воды, выделяемые пользователям, и массы примесей, отводимых ими в водные объекты, а также цены за воду и услуги водоотведения. Величины объёмов воды и масс примесей, а также цены определяются в результате решения базовых задач, описывающих функционирование и выбор параметров ВХС. В них максимизируется результат использования водных ресурсов всей ВХС, оцениваемый достигнутыми значениями производственных функций пользователей.

Базовые задачи, подробно рассмотренные в [13, 14], представляют собой двухэтапные задачи стохастического программирования на сети, конфигурация которой воспроизводит конфигурацию моделируемой ВХС. Стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, выступают потоки, моделирующие значения ориентиров объёмов водных ресурсов и масс содержащихся в них примесей. Потоки в сети, соответствующие реальным объёмам водных ресурсов и массам примесей, играют роль тактических переменными второго этапа, выбираемых при известных реализациях стохастических условий. Допустимые множества базовых задач выделяется двумя группами условий. Условия функционирования отдельных элементов характеризуются как реально доступными в различных стохастических условиях объёмами водных ресурсов и массами примесей, так и их ориентирами – гарантированными значениями этих показателей. Общесистемные ограничения, включающие описание взаимодействия элементов ВХС, в частности, уравнения баланса масс воды и примесей, выделяются в виде множества допустимых значений переменных, соответствующих только реальным величи-

нам объёмов водных ресурсов и масс примесей. Целевые функции базовых задач оценивают математическое ожидание эффективности функционирования ВХС. Они формируется из производственных функций, сообщаемых пользователями центру, в виде их суперпозиций.

Базовые задачи – модели рационального использования водных ресурсов без явного учёта их качества и управления качеством водных ресурсов при фиксированных их количественных показателях представляют собой задачи выпуклого программирования. Решение этих задач может быть осуществлено с применением любого метода нахождения максимума вогнутой (минимума выпуклой) функции на выпуклом множестве [6,19].

Базовые задачи – модели совместного управления количеством и качеством водных ресурсов многоэкстремальные, общих методов решения которых нет. Однако особенность рассматриваемых задач, в которых максимизируются обобщённо сепарабельные функции на множествах, выделяемых наряду с линейными ограничениями, также билинейными уравнениями, позволяет построить метод их решения, представляющий собой детализацию схемы ветвей и границ [17]. Решение исходной задачи с погрешностью, не превосходящей заданную погрешность, сводится к решению конечной последовательности оценочных задач выпуклого программирования, формирование которых основано на построении вогнутых оболочек отдельных слагаемых функций цели и выпуклых оболочек ограничений на системе сужающихся прямоугольных множеств.

Базовые задачи – модели согласования интересов водопользователей при возможных изменениях технологий использования водных ресурсов, реконструкции существующих и введении в строй новых элементов дополняются взаимосвязанными булевыми переменными, положительные значения которых соответствуют принимаемым вариантам элементов ВХС. Поиск оптимальных векторов этих частично целочисленных задач нелинейного программирования также сводится к решению конечной последовательности оценочных задач выпуклого программирования, формирование которых основано на построении вогнутых оболочек отдельных слагаемых функций цели (при совместном управлении количеством и

качеством водных ресурсов и выпуклых оболочек ограничений) на системе сужающихся прямоугольных множеств.

Особенность допустимых множеств базовых задач и оценочных задач, формируемых при реализации схемы ветвей и границ, состоящая в отдельности ограничений на переменные, моделирующие значения реальных объёмов водных ресурсов и масс содержащихся в них примесей и их ориентиров, предоставляет возможность применить метод групповой координатной оптимизации, в котором последовательно отыскивается оптимум по группам системных и индивидуальных переменных [20]. Этот метод привлекателен тем, что в выработке решений взаимодействуют центр, распоряжающийся системными переменными – реальными объёмами воды и массами примесей, и пользователи, ответственные за индивидуальные переменные – ориентировочные значения объёмов водных ресурсов и масс примесей. Это даёт возможность наблюдать и оценивать последовательные приближения к оптимальному решению и переосмысливать проблему.

### **Механизм согласования**

Центр, заинтересованный в выделении ресурсов, величины которых соответствуют оптимальным векторам базовой задачи, информацией о действительных функциях затрат элементов не обладает. Ему известны функции предпочтения, сообщаемые пользователями – активными элементами, которые должны внешне правдоподобно оценивать эффективность использования водных ресурсов и затраты водоотведения. Вместо базовой задачи центр решает некоторую сформированную задачу, допустимое множество которой совпадает с допустимым множеством базовой задачи, а целевой является функция, образованная из представленных пользователями функций предпочтения. Центр выделяет пользователям водные ресурсы и назначает отводимые массы примесей в соответствии с решением сформированной задачи[13].

Для осуществления выработанной стратегии её требуется дополнить механизмом взаимодействия центра и пользователей. Регулятором взаимоотношений «продавца» ресурсов – центра и «покупателей» – пользователей выступают цены за гарантированные поставки водных ресурсов и сброс сточных вод, а также плата за

отклонения от них. Цена, по которой центр «продаёт» пользователю выделяемые в соответствии с решением сформированной задачи гарантированные водопользование и водоотведение, определяется эффективностью использования ресурса. Целесообразно назначать цену, отражающую часть «гарантированной» прибыли, получаемой пользователем. Сложнее обстоит дело с решением проблемы назначения платы за отклонения величин текущих поставок ресурсов от их гарантированных величин.

Традиционным является маржиналистский подход к оценке изменений результатов производства и назначения цен («теневых цен») при отклонениях значений спотовых поставок от величин форвардных контрактов. В нем реализуется принцип предельной полезности – оценивания изменения результатов производства при бесконечно малом изменении количества используемого ресурса. В соответствии с этим подходом цена поставки дополнительной (сверх ориентира) или недопоставки каждой единицы ресурса является ценой «последней» планируемой к использованию единицы. Этот подход корректен для линейных целевых функций, а также для нелинейных при условии, что отклонения значений поставляемых количеств ресурсов от ориентиров незначительны. Функции ущербов пользователей нелинейные и, следовательно, такими являются функции «ущербов» представленных пользователями функций предпочтения. Величины предоставляемых количеств ресурсов могут намного отличаться от их ориентиров. При таком подходе потери эффективности, обусловленные дефицитом ресурсов, значительно превосходят компенсацию, получаемую за их недопоставку. Оплата пользователем профицита водных ресурсов превосходит результат их использования. Не спасает дела умножение теневых цен на некоторые коэффициенты, так как отсутствуют объективные предпосылки выбора значений этих коэффициентов. Поэтому предлагается перейти от назначения цен, формируемых оптимальными двойственными переменными базовой задачи, к ценам за ресурсы, соответствующим их вкладу в результативность производства [13].

Отклонения от ориентиров объёмов воды и масс примесей, поступающих пользователям и отводимых от них, приводят к изменениям результатов использования водных ресурсов. Возникает пот-

ребность в сопоставлении эффективности воздействий отклонений величин текущих поставок ресурсов от гарантированных величин. Сопоставление оценивается коэффициентами, отражающими влияние количества и качества водных ресурсов на результативность их использования элементами ВХС в различных условиях. Коэффициенты значимости отклонений объёмов водных ресурсов, а также масс поступающих и отводимых примесей неотрицательны и образуют выпуклую комбинацию. С помощью этих коэффициентов формируются комплексные оценки отклонений от ориентиров в виде взвешенных сумм отклонений объёмов водных ресурсов и масс примесей от их гарантированных величин.

В основном варианте ВХС платит пользователю за каждую единицу комплексного отклонения, приводящего к потере результативности использования водных ресурсов, по цене риска – усреднённого ущерба, определённого в результате решения сформированной задачи – аналога базовой задачи. За поставку водных ресурсов, приводящую к увеличению эффективности их использования, пользователь оплачивает каждую единицу комплексного отклонения по усредненной цене шанса её использования, определённого в результате решения сформированной задачи. Для стимулирования стремлений использовать излишки водных ресурсов (если таковые стремления высказаны пользователями) регулирующему органу (центру) можно предложить назначать цены при комплексных отклонениях водных ресурсов от их гарантированных величин по наименьшему шансу и наибольшему ущербу единицы их использования [13].

Назначение сообщаемых пользователями центру функций предпочтения, значения которых больше истинных производственных функций, может повлечь за собой увеличение значений гарантированного водопользования и связанного с этим увеличением показателей использования ресурсов в идеальных условиях. В этом случае комплексные отклонения величин поставляемых ресурсов от гарантированных значений при реализациях стохастических условий могут привести к ущербам, значительно превышающим «дополнительную» эффективность использования гарантированного водопользования. Назначение функций предпочтения, значения которых меньше истинных производственных функций, уменьшает

величины ущербов, однако при этом падает эффективность гарантированного водопользования. В обоих случаях отклонений сообщаемых функций предпочтения от истинных производственных функций риск увеличивается, Поэтому пользователям, не склонным к рискам (пользователи, представляющие собой хозяйствственные субъекты, именно такие), невыгодно искажать информацию об эффективности использования водных ресурсов. Они будут сообщать центру истинные функции предпочтения. Будет решаться базовая задача.

Таким образом, при раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов, где базовыми являются задачи выпуклого программирования, назначение цен за водные ресурсы, соответствующее их ценности при производстве продукции, обеспечивает достижение совершенного согласования интересов водопользователей.. При совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов, согласование получается приближенным, с погрешностью, определяемой точностью решения базовой многоэкстремальной задачи [13].

### **Рынок водных соглашений**

Соглашения об использовании водных ресурсов заключаются на определенный срок, в течение которого появляются новые пользователи и прекращают работу ранее функционировавшие. Развивается производство, меняются технологии и отношение общества к использованию воды. Возникает проблема пересмотра действующих соглашений, решение которой видится в формировании управляемого рынка соглашений на использование водных ресурсов и водоотведение. Управление рынком необходимо для обеспечения интересов водопользователей, а также благополучия водной среды и окружающих территорий.

Рыночный пересмотр разрешений на использование водных ресурсов и сброс сточных вод происходит в рамках ВХС, функционирующих в стохастических условиях водопользования и водоотведения [14]. Из-за пространственной распределенности ВХС, наряду с активными участниками актов купли-продажи, непосредственно обменивающимися разрешениями, присутствуют пассивные пользователи, на эффективность функционирования которых влияют

сделки, заключаемые активными участниками рынка. Соблюдение интересов пассивных водопользователей (интересы активных пользователей не нарушаются, в противном случае сделки купли-продажи не совершаются), а также благополучия водной среды и окружающих территорий обеспечивается управляющим органом ВХС – центром.

Известно начальное распределение объёмов воды и масс примесей. Продаются и покупаются разрешения на их использование. Из-за возможных потерь воды в фрагментах сети ВХС пользователи могут получать только часть купленных водных ресурсов, величины которых определяются коэффициентами влияния продавцов на покупателей. Например, пользователь, расположенный ниже по течению реки, при покупке водных ресурсов у пользователя, расположенного выше, из-за потерь воды «по дороге» может использовать только ту часть покупки, которая дойдёт до него. И наоборот, разрешение на использование водных ресурсов, купленное у пользователя, расположенного ниже по течению, пользователем, расположенным выше, может быть использовано в большем объёме. Так как в сбросах разных пользователей содержатся различные составы примесей, то пользователь, купивший разрешение (квоту) на сброс, может воспользоваться им частично. Возможная для использования доля купленного разрешения определяется соотношениями примесей в составе сбросов продавца и покупателя.

При покупке и продаже разрешений преобразуются возможности пользователей и происходят изменения их целевых функций. Начальные квоты объёмов водных ресурсов, поступающих пользователям, и разрешённые вначале величины сбросов загрязняющих веществ заменяются новыми значениями. В целевые функции включаются доход от продажи разрешений, затраты на приобретение квот и компенсации возможных потерь у пассивных участников рынка. В процессе перераспределения разрешений на использование водных ресурсов и сброс сточных вод пользователи по отношению к различным сделкам купли-продажи могут быть одновременно продавцами, покупателями и пассивными участниками рынка.

Центр заинтересован в рациональном распределении водных ресурсов, а также в средствах для обеспечения функционирования ВХС, которые поступают в виде отчислений при совершении актов

купли-продажи. Они аккумулируются в фонде стабилизации, предназначенному для компенсации возможных потерь у пассивных участников рынка при совершении актов купли-продажи активными участниками, а также в фонде развития системы, средства которого используются для поддержания ВХС в рабочем состоянии и ее совершенствовании. Его интересы заключаются в наибольших отчислениях в эти фонды, создающие условия преобразования соперничества пользователей за водные ресурсы в их сотрудничество.

При возникновении хотя бы одной пары активных участников рынка (или нескольких активных пользователей), которые договорились об обмениваемых объёмах водных ресурсов и сбросах загрязняющих веществ, а также их ценах, центр проверяет возможность таких обменов. Для этого решается задача, допустимое множество совпадает с допустимым множеством вышеописанной базовой задачи, а целевой максимизируемой функцией служит сумма отчислений в фонд стабилизации. В результате решения указанной задачи центра определяются потоки, возникающих в результате предполагаемых сделок, которые должны удовлетворять условиям допустимости распределений водных ресурсов и масс примесей. Если не существуют допустимые потоки, то пользователи корректируют свои предложения. При потоках, удовлетворяющих условиям допустимости, для пассивных участников рынка разрешений на основе решения задачи устанавливаются цены, по которым им либо компенсируется снижение эффективности использования водных ресурсов, либо они платят за повышение эффективности их использования. Средства, необходимые для компенсации потерь эффективности пассивных пользователей, формируются из отчислений, производимых активными пользователями и пассивными пользователями, эффективность функционирования которых повышается, дополненных средствами стабилизационного фонда центра.

Описанная процедура рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов характеризуется тем, что при каждой реализации стохастических условий оценки эффективности использования водных ресурсов всех пользователей – значения их производственных функций не снижаются, при этом у некоторых, в частности у активных, повышаются. Ориентиры – гарантированные

показатели количества и качества водных ресурсов, являющиеся индивидуальными переменными, в этом процессе в явном виде не участвуют. Они влияют на согласование через производственные функции, зависящие как от величин объёмов водных ресурсов и масс примесей, содержащихся в них в различных стохастических условиях, так и от значений их ориентиров.

Переход от исходных значений водных ресурсов и масс примесей к новым значениям влечёт пересмотр величин гарантированного водопользования. Осуществляется переход (при закреплённых новых значениях водных ресурсов и масс примесей) от исходных показателей гарантированных водопользования и водоотведения к новым значениям, оценивающим разрешённые объёмы водных ресурсов и массы сбросов, на которые ориентируются водопользователи. Их значения соотнесены конкретным пользователям и не связаны с другими пользователями, которые решают свои двухэтапные стохастические задачи максимизации математического ожидания эффективности использования выделенных водных ресурсов и сбросов сточных вод. Таким образом, при замене в результате рыночного обмена начального распределения разрешений на использование водных ресурсов и сброс масс примесей на преобразованные показатели оценки эффективности водопользования и водоотведения водопользователей не убывают, а у некоторых, в частности, у активных пользователей, – строго возрастают.

Замена начального распределения водных ресурсов и масс примесей на преобразованные, а также переход от начальных оценок эффективности их использования к новым оценкам, может привести к появлению пользователей, стремящихся продать и купить разрешения на использование водных ресурсов и сброс загрязняющих веществ. В этом случае описанная процедура купли-продажи повторяется. На каждом шаге этого итерационного процесса оценки эффективности пользователей, использующих водные ресурсы и сбрасывающих сточные воды, повышается. Эффективность использования водных ресурсов ограничена. Так как возрастающая ограниченная сверху последовательность имеет предел, описанный итерационный процесс рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов сходится. Таким образом, в рамках управляемого центром рынка разрешений на использование вод-

ных ресурсов и сброс сточных вод достигается согласование интересов водопользователей [14].

### **Согласование интересов пользователей в динамических условиях**

Выше рассмотрен механизм согласования интересов пользователей, конкурирующих за использование водных объектов, в статической постановке, в которой временные особенности поступления водных ресурсов и потребностей в них в явном виде не представлены. Во многих случаях такое согласование недостаточно полно отражает специфику использования водных ресурсов из-за несоответствия сезонных вариаций стока рек и потребностей водопользования. Зачастую конфликтные ситуации создают также противоречивые требования пользователей ко времени поступления водных ресурсов. Интересы Узбекистана, Казахстана и Туркмении, расположенных в среднем и нижнем течении Сырдарьи и Амударьи – основных источников водных ресурсов Центрально-Азиатского региона, противоречат интересам Таджикистана и Киргизии, расположенных в верховьях этих рек. Таджикистан и Киргизия заинтересованы в использовании водных ресурсов для выработки электроэнергии. Для этого требуется воду накапливать летом и срабатывать через турбины ГЭС зимой. Узбекистану, Казахстану и Туркменистану вода нужна в вегетационный период: её надо накапливать зимой и использовать летом. Возникает потребность в механизмах выработки стратегий согласованного использования общих водных ресурсов в динамических условиях.

Построение механизмов согласования интересов пользователей в динамических условиях так же, как в статике, основывается на потоковом структурировании ВХС, функционирование которых рассматривается в дискретном времени. Отметим, что в отличие от большинства экономических задач в управлении водопользованием, существенно разбивать расчётный период на неравнодлительные интервалы. Например, в климатических условиях южной России вода для гидромелиорации требуется в течение примерно 3 мес. в год, для поддержания необходимых глубин для судоходства – около 5 мес., и этот интервал пересекается с «гидромелиоративным», экологические попуски производятся в течение нескольких дней. К элементам сети, соответствующей описанию функционирования

ВХС в статической постановке, добавляются находящиеся в её вершинах «склады», которые изображают водохранилища (с расположенным на них пользователями), призванные перераспределять водные ресурсы во времени. Запасы в «складах» моделируют объёмы воды и массы примесей в водохранилищах. Результат использования водных ресурсов и управления их качеством за расчётный период, оценивается функцией, представляющей собой сумму оценок экономических результатов их использования в выделенных временных промежутках.

Представление ВХС как потоковой системы предоставляет возможность интерпретировать ее в динамических условиях в виде функционирования эквивалентной потоковой системы в статических условиях [14]. Для этого исходная сеть трансформируется в расширенную сеть, которая формируется из исходной сети повторением её по числу временных сечений – концов отрезков времени, на которые разбит расчётный период. Подсети временных сечений расширенной сети, конфигурации которых совпадают с конфигурацией исходной сети, связаны дугами, моделирующими склады, и дугами с ненулевым запаздыванием в исходной сети. Каждому складу, расположенному в вершине исходной сети, в расширенной сети соответствует набор дуг, которые связывают подсети различных временных сечений. Дуги исходят из вершин подсетей и заходят в соответствующие им вершины в следующих во времени подсетях. Потоки в них моделируют объёмы воды в водохранилищах. Дугам исходной сети, моделирующим элементы ВХС с запаздыванием между моментами изъятия и возврата воды в систему, в расширенной сети соответствуют дуги, исходящие из вершин подсетей, соответствующих створам изъятия воды, и заходящие в вершины подсетей, изображающих створы возврата воды.

Сведение моделирования функционирования и выбора параметров ВХС в динамических условиях к функционированию эквивалентной системы в статических условиям, означает, что механизмы выбора параметров, формирования согласованных стратегий использования водных ресурсов и сброса сточных вод в статических условиям в равной степени пригодны и для динамических условий[14].

При согласовании интересов водопользователей в динамических условиях при выборе параметров элементов варианты водоподготовки, водопользования и водоочистки описываются взаимосвязанными булевыми переменными, которые не зависят от времени и поэтому не влияют на описанное выше преобразование исходной динамической структуры функционирования ВХС к эквивалентной статической конструкции. Поэтому механизмы согласования интересов пользователей при выборе параметров элементов в статических условиях преобразуются в механизмы выбора согласованных параметров в динамических условиях [14].

Согласование интересов водопользователей – элементов ВХС в условиях возможных изменений параметров элементов и технологий использования водных ресурсов во времени (проблема развития ВХС) отличается от проблемы выбора параметров учётом в ней этапности ввода вариантов. В модель потребовалось включить описание возможных переходов от одних вариантов к другим. Такое описание осуществляется с применением взаимосвязанных булевых переменных, соответствующих вариантам развития, которые в этом случае зависят от времени, а также переменных, описывающих ввод и вывод вариантов водопользования [14]. Переменные ввода принимают значение 1 в момент начала функционирования соответствующего варианта, в остальные моменты времени их значения – ноль. Функции вывода равны 1 в момент окончания функционирования варианта и ноль – во все остальные моменты времени. Переменные, соответствующие реализуемым и гарантируемым объёмам воды и массам примесей, принимают значения только в своём временном отрезке из расчётного периода. Булевые переменные, соответствующие вариантам развития, а также переменные, соответствующие вводу и выводу вариантов, также заданы лишь на своих временных отрезках. Функции, оценивающие экономический результат использования водных ресурсов и управления их качеством водопользователями в течение расчётного периода, представлены в виде сумм слагаемых, каждое из которых зависит только от результатов водопользования в своём временном отрезке. Таким образом, и в этой, самой общей из ситуаций, исходная проблема согласования интересов водопользователей в динамических условиях в результате вышеописанного перехода от исходной сети к расширенной сети

заменяется эквивалентной проблемой согласования стратегий в статических условиях. Поэтому рассмотренные механизмы согласования интересов водопользователей, использующих водные объекты при выборе параметров водопользования в статических условиях, преобразуются в механизмы согласования интересов водопользователей в динамических условиях также и в условиях возможных изменений во времени параметров элементов ВХС и технологии использования водных ресурсов [14].

### **Комплекс моделей**

Согласование интересов конкурирующих водопользователей целесообразно осуществлять с использованием описанных выше методологии и комплекса математических моделей формирования механизмов разрешения конфликтных ситуаций водопользования, с различной полнотой и подробностью учитывающих особенности эксплуатации водных ресурсов и управления их качеством. Согласование происходит поэтапно. На каждом этапе используется наиболее простые модели, отвечающие целям этапа. Это позволяет в интерактивном режиме общения центра и пользователей оценивать исходные данные, осмысливать вносимые упрощения, анализировать получаемые решения и, при необходимости преобразовывать модели. Согласование начинается с применения простейшей модели и затем, по мере необходимости, осуществляется переход к моделям, более полно отражающим особенности использования водных ресурсов и управления их качеством. Предлагается 7-этапная процедура последовательного уточнения вырабатываемых компромиссных стратегий, с вовлечением доступной информации, которая на длительную перспективу не может быть ни полной, ни точной [14].

Вначале, на первом этапе, ВХС структурируется в виде веерной схемы – весьма частного случая сети. Все водные ресурсы системы за весь расчётный период сосредоточиваются в одной вершине, изображающей источник водных ресурсов. Из него элементы ВХС – водопользователи получают по мере возможности необходимую им воду. Все располагаемые водные ресурсы без учёта качества собираются в ресурс, объём которого соответствует совокупному ресурсу, и помещаются в вершину, изображающую источник. Элементы ВХС формируют спрос на водные ресурсы и оценивают результат

использования водных ресурсов в виде производственных функций, описанных выше. В рассматриваемой на первом этапе модели А согласования интересов водопользователей максимизируется математическое ожидание суммарного результата использования водных ресурсов ВХС. Для решения задачи, описывающей модель, так же как для всех задач последующих всех этапов, естественно применить метод групповой координатной оптимизации [20]. В нём последовательно отыскивается оптимум по группам системных переменных – реальных объёмов водных ресурсов, которыми распоряжается центр (ВХС), и индивидуальных переменных, которые принадлежат пользователям, – ориентировочных значений объёмов водных ресурсов. Это даёт возможность наблюдать и оценивать последовательные приближения к оптимальному решению и при необходимости переосмысливать проблему.

Поиск компромисса между требованиями элементов ВХС и возможностями их выполнения показывает, существует ли хотя бы гипотетическая возможность удовлетворить их запросы. Если обнаруживается отсутствие решения, то пересматриваются экзогенные параметры модели, в частности, требования пользователей. Если решение существует, то пользователи проводят анализ полученного решения, в котором участвуют: стоимостные оценки водных ресурсов и их ориентировочных величин, риски и шансы. При положительной оценке достигнутого результата осуществляется переход ко второму этапу, в котором согласование интересов пользователей осуществляется на основе решений, получаемых в математической модели, описывающей пространственное распределение объёмов воды и масс примесей. В противном случае модель пересматривается и формируется новая задача первого этапа.

Модели, рассматриваемые на 2–6 этапах, представлены базовыми задачами, описанные выше. Во всех случаях при отсутствии допустимого вектора задачи и/или при неудовлетворённости пользователей её решением, задача пересматривается. Если при корректировке модели не удаётся достичь положительного результата, то осуществляется возврат на предыдущий этап. При положительной оценке результата следует переход к следующему этапу. Модель второго этапа  $G_2$  представлена задачей оптимального использования водных ресурсов и управление их качеством в статической по-

тановке. Её подмодели  $D_2$  и  $E_2$  характеризуют использования водных ресурсов и управление их качеством порознь. На третьем этапе в модели  $G_3$  осуществляется выбор параметров пользователей и ВХС при совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов в статической постановке. Её подмодели  $D_3$  и  $E_3$  описывают выбор параметров пользователей при раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов. На четвёртом этапе с использованием модели  $G_4$  происходит согласование стратегий использования водных ресурсов и управления их качеством в динамике, её частные случаи – её подмодели  $D_4$  и  $E_4$  описывают согласование стратегий при раздельном использовании водных ресурсов и управлении их качеством. Модель пятого этапа  $G_5$  представлена задачей определения оптимальных параметров элементов ВХС при совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов в динамической постановке, которая включает как частные случаи подмодели  $D_5$  и  $E_5$ , описывающие выбор параметров при раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов. На шестом этапе с использованием модели  $G_6$  осуществляется выбор поэтапно вводимых параметров при совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов в динамической постановке. При раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов в выборе параметров используются её подмодели  $D_6$  и  $E_6$ .

На седьмом этапе согласованные стратегии использования водных ресурсов и управления их качеством, а также параметры ВХС и пользователей, определённые на предыдущих этапах в оптимационных моделях, уточняются с использованием имитационных моделей. В имитационных моделях, воспроизводящих процесс функционирования, ВХС также изображается сетью с перемещающимися по ней потоками, соответствующими потокам воды и примесей в системе, целевые функции в явном виде отсутствуют. Появляется возможность со значительно большей подробностью представить параметры и процессы, не учтённые в моделях оптимизации, рассмотренных на предыдущих этапах, в частности, структурировать ВХС в виде сети, более подробно отражающей взаимосвязи элементов, чем в моделях предыдущих этапов. Также можно более подробно представить динамические особенности использования водных ресурсов и множество реализаций стохастических

условий. Известны различные имитационные модели, описывающие процесс функционирования ВХС: балансовые [24], узловые [7], камерные [26], синтетические [15], агрегативные [18] и другие. В зависимости от особенностей ВХС согласование стратегий пользователей может потребовать применения нескольких имитационных моделей, отражающих различные аспекты водопользования.

Вариантные расчёты с использованием имитационных моделей проводятся индивидуально для каждой реализации стохастических условий при фиксированных значениях параметров элементов ВХС, а также гарантированных показателей водоподготовки, водопользования и водоочистки, которые также можно представить в более подробной форме. В результате серии вариантовых расчётов центр совместно с пользователями, руководствуясь в основном неформальными соображениями о предпочтительных режимах, выбирают рациональный вариант функционирования ВХС. Если в результате серии имитационных экспериментов удается найти приемлемое решение, процесс выработки согласованных стратегий использования водных ресурсов и управления их качеством можно полагать завершённым. В противном случае осуществляется возврат к модели шестого этапа, которая трансформируется в соответствии с неувязками, выявленными на седьмом этапе.

Описанную выше взаимосвязь этапов выработки стратегии согласования интересов трансграничных водопользователей иллюстрирует блок-схема взаимодействия моделей, представленная на рис. Блоки представляют модели: (1) – простейшая веерная модель первого этапа А, (2) – модель управления в статической постановке  $G_2$  (её подмодели  $D_2$  и  $E_2$ ), (3) – модель выбора параметров статической постановке  $G_3$  (её подмодели  $D_3$  и  $E_3$ ), (4) – модель управления в динамике при закрепленных параметрах  $G_4$  (её подмодели  $D_4$  и  $E_4$ ), (5) – модель выбора параметров в динамических условиях  $G_5$  (её подмодели  $D_5$  и  $E_5$ ), (6) – модель развития ВХС, учитывающая этапность ввода параметров в динамике  $G_6$  (её подмодели  $D_6$  и  $E_6$ ), имитационная модель  $G_7$ .

При согласовании интересов водопользователей на основе рассмотренного многоэтапного комплекса математических моделей, последовательно уточняющих решения, где стратегии сравниваются, отбраковываются и выбираются рациональные, может потребо-

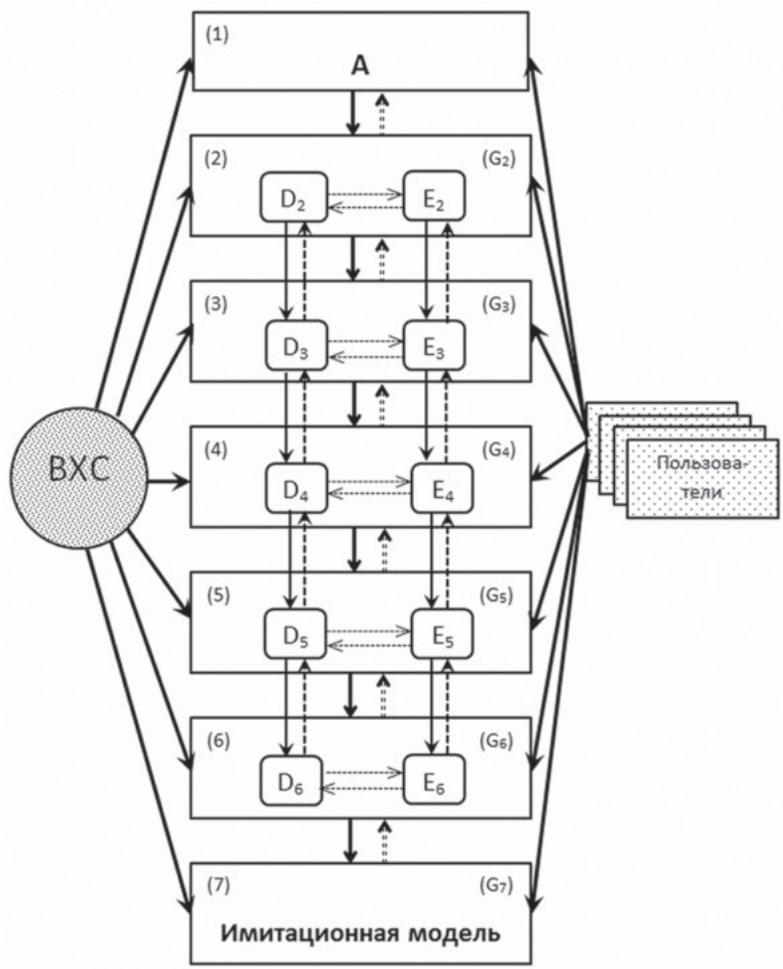


Рис. Блок схема взаимодействия моделей

ваться его модификация. Допускается изменение состава моделей и их структуры, часть из предложенных моделей может быть исключена из рассмотренной системы, что нисколько не изменяет общую «идеологию» их взаимодействия. Это положение остаётся справедливым, если комплекс моделей дополняется иными моделями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Э.Ф., Данилов-Данильян В.И., Завельский М.Г. Проблемы разработки системы оптимального планирования народного хозяйства. М.: ЦЭМИ АН СССР, 1970. 126 с.
2. Бончковский Н.Ф., Кузин А.К. К вопросу совершенствования правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами // Водные ресурсы. 1986. №3. С. 22–30.
3. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. 255 с
4. Бурков В.Н., Лернер А.Я. Принцип открытого управления активными системами. М.: Ин-т проблем управления, 1971. 26 с.
5. Ватель И.А., Ерешко Ф.И. Математика конфликта и сотрудничества. М.: Знание, 1973. 64с
6. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1981, 400 с.
7. Воропаев Г.В. Резервы ирригации, связанные с оптимизацией использования водных ресурсов // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. М.: Наука. 1973. С. 151–179.
8. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами (Теория принятия решений при неполном единстве). М.: Издательство МГУ, 1972, 183 с.
- 9 Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами. М.:Наука, 1976. 327 с.
10. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Водохозяйственные системы в условиях неопределенности (методология управления природно-техническим комплексом) // Инженерная экология, 2010, №6 (96), С. 27–45.
11. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Водохозяйственные системы как иерархические системы согласования стратегий водопользования // Инженерная экология, 2011, №3, С. 3–23.
12. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Производственные функции в условиях неопределенности // Экономика и математические методы. 2007. Т. 43. №1. С. 16–26.
13. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Механизм разрешения конфликтных ситуаций в условиях несовершенной конкуренции // Известия РАН. Теория и системы управления, 2016, №3, С. 163–173.
14. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Согласование стратегий трансграничного водопользования. М: Энциклопедия, 2016а, 216 с.
15. Жданов А.Ю., Горстко А.Б. Математическая модель рационального использования водных ресурсов Азовского бассейна // Водные ресурсы. 1975. №3. С. 188–192.
16. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока на основе теории вероятностей // Труды ВИСУ, Гидротехнический сборник. 1932. №4. С. 7–31.

- 17 Лазебник А.И., Хранович И.Л., Цаллагова О.Н. Обобщенные сепарательные задачи и их приложения // Автоматика и телемеханика. 1981. №8. С. 107–118.
18. Немчинов Б.В., Шнайдман В.М. Агрегативная модель региональной водохозяйственной системы // Теория сложных систем и методы моделирования. М.: ВНИИСИ. 1983. С. 113–124.
19. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука. 1983. 384 с.
20. Райков Л.Д. Вопросы построения и применения АВМ для многовариантных задач. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МИЭМ, 1966. 239 с.
21. Bertrand J. Book review of theorie mathematiques de la richesse sociale and of recherches sur les principes mathematiques de la theorie des richeresses // J. Savants. 1883. V. 67. P. 499–508.
22. Cournot A. Recherches sur les principes mathematiques de la theorie des richeresses. Paris: L. Hachette, 1838. 198 p.
23. Hazen A. The storage to be provided in impounding reservoirs for Municipal water supply // Trans. ASCE. 1914. V. 77. P. 1539–1659.
24. Sigvaldason O. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system // Water Resour. Res. 1976. V. 12. №2. P. 263–278.
25. Stackelberg H. Marktform und Gleichgewicht. Vien; Berlin: Verlag von J. Springer, 1934. 469 p.
26. Thoman R.V. Mathematical model for dissolved oxygen // J. Sanit. Eng. Div. ASCE. 1963. V. 89. №5. P. 1–30.

# **Изучение и оценка подземного стока и ресурсов пресных подземных вод как основы их рационального использования и охраны**

*Р.Г. Джамалов*

Первым научным руководителем и организатором гидрогеологических исследований в Институте водных проблем со дня его основания был известный ученый, профессор Б.И. Куделин. Он заложил основную направленность исследований подземных вод как элемента водного баланса и компонента окружающей среды. Среди всего многообразия возможных задач приоритет был отдан подземному стоку, оценке ресурсов, режима и баланса подземных вод. Такая направленность исследований представляется оправданной и обоснованной в Институте водных проблем при комплексном изучении вод суши в их единстве и взаимодействии.

## **Направления исследований в области гидрогеологии в ИВП до 2000 г.**

Среди основных направлений исследований и их результатов можно выделить: изучение особенностей формирования и оценка подземного стока и естественных ресурсов подземных вод; исследование подземного водообмена суши и моря и оценка подземного стока в моря и океаны; исследования режима подземных вод и его прогнозы; изучение процессов формирования качества подземных вод в различных условиях и оценка их защищённости от загрязнения.

Исследования подземного стока и естественных (возобновляемых) ресурсов подземных вод проводились с первых же дней создания ИВП. Большим коллективом гидрогеологов, гидрологов, водохозяйственников и изыскателей различных организаций страны (МГУ, ГГИ, ВСЕГИНГЕО, Геологических управлений регионов и др.) под научно-методическим руководством сотрудников Института (Куделин, И.С. Зекцер, Р.Г. Джамалов, Н.А. Лебедева), выполнены работы по оценке подземного стока территории бывшего СССР и составлена Карта подземного стока территории СССР в масштабе 1:2 500 000, опубликованная в 1974 г. За последующие годы составлены более детальные карты подземного стока и естественных ресурсов подземных вод некоторых крупных артезианских бассейнов страны

(Прибалтийского – Зекцер, Московского – Лебедева, Терско-Кумского – Джамалов, Азово-Кубанского – И.В. Диордиев), отражающие основные особенности их формирования в различных природных условиях.

Выполненные региональные оценки основаны на анализе и обработке уже имеющихся гидрологических и гидрогеологических материалов без проведения специальных дорогостоящих разведочных работ, что определяет их экономическую эффективность. Количественные удельные и относительные показатели подземного стока и возобновляемых ресурсов подземных вод придали уже традиционным гидрогеологическим картам принципиально новое содержание и определили их востребованность при инженерных оценках и прогнозных расчётах.

Проведение впервые в мире таких крупных пространственно-временных обобщений позволило выявить основные региональные закономерности формирования и распределения среднегодовых и минимальных модулей и коэффициентов подземного стока в различных природных условиях и установить их связь с общей природной зональностью. На основе статистических анализа и методов моделирования рассмотрено влияние на подземный сток таких региональных факторов, как мощность и состав пород зоны аэрации, эрозионной расчленённости и фильтрационных свойств водоносных горизонтов. Статистическими методами показаны тенденции многолетней цикличности подземного стока [10; 14].

Данные о подземном стоке легли в основу расчётов выноса растворённых веществ подземными водами (ионный подземный сток) и их денудационной деятельности. Показано, что ионный подземный сток превышает величину выноса растворённых веществ поверхностным стоком. Под влиянием этого выноса в естественных условиях за тысячелетия происходит снижение земной поверхности, и этот процесс значительно активизируется при интенсивной эксплуатации подземных вод. Величины подземного стока и их распределение по территории позволяют количественно оценить темпы и сроки водообмена подземных вод, что принципиально при оценке перспектив использования водных ресурсов, особенно при условии их дефицита, в отдельных регионах.

Опыт российских специалистов по региональной оценке и картированию подземного стока и естественных ресурсов подземных вод получил международное признание. В соответствии с решением Национальных комитетов по Международной гидрологической программе ЮНЕСКО в начале 1980-х гг. выполнены работы по оценке и картированию подземного стока территории Центральной и Восточной Европы. Впервые в истории подобных исследований составлена и издана довольно детальная международная карта подземного стока Центральной и Восточной Европы масштаба 1:1 500 000 и монография «Подземный сток Центральной и Восточной Европы» [22], которые до сих пор не имеют аналогов.

Плодотворное сотрудничество гидрогеологов ИВП со специалистами различных стран под эгидой ЮНЕСКО продолжалось и в последующие годы. В соответствии с решением ЮНЕСКО по Международной гидрологической программе гидрогеологами ИВП выполнены исследования по Международному проекту «Роль подземных вод в гидрологическом цикле и континентальном водном балансе» (Зекцер, Джамалов, Т.И. Сафонова, Диордиев). В результате составлен и опубликован в ЮНЕСКО 1988 г. доклад по этой проблеме [25; 24].

Основным результатом исследований по международному проекту ЮНЕСКО является Карта гидрогеологических условий и подземного стока Мира в масштабе 1:10 000 000. Она составлена по заданию ЮНЕСКО и опубликована в 1999 г. в США. [26; 20]. Методика работ, легенда, и основное содержание Карты разработаны специалистами Института водных проблем РАН под научно-методическим руководством и непосредственном участии Джамалова, Зекцера, Сафоновой, Диордиева, Лебедевой, Л.П. Новосёловой и др. Карта прошла редактирование международной редколлегией из ведущих специалистов Австралии, Аргентины, Бразилии, Германии, США, Индии, Франции, Италии, Китая, Индонезии и др. стран. Она рекомендована для широкого использования в научных и учебных целях. Карта представляет собой специальную тематическую гидрогеологическую карту, основным содержанием которой является распределение количественных характеристик подземного стока, а также геологических и гидрогеологических условий формирования подземных вод.

На Карте помимо водовмещающих пород и их литологического состава, отражается специальная информация о распределении по площади количественных характеристик подземного стока: его модулей и коэффициентов. Совмещенное картографическое изображение двух указанных количественных характеристик, существенно увеличивающее информативность карты. Кроме того, на Карте отражены также особые условия формирования подземного стока, связанные с активным воздействием инженерной деятельности человека, участками поглощения поверхностного стока в руслах рек, с рифтовыми зонами, региональными разломами и т.д.

Карта впервые в практике регионального гидрогеологического картирования отражает условия разгрузки подземных вод в моря и океаны с количественной характеристикой этого процесса в моря и океаны со всех континентов и островов в модулях субмаринного подземного стока в пределах наиболее изученной части акватории – шельфа.

Таким образом, основное содержание Карты – конкретная количественная информация, которая позволяет решать важные региональные задачи: определения величин подземного стока и естественных ресурсов подземных вод для планирования комплексного использования и охраны водных ресурсов; определения величин восполнения (питания) подземных вод для оценки их роли в общих водных ресурсах и водном балансе отдельных территорий, бассейнов морей и крупных рек; определения роли естественных ресурсов подземных вод в их эксплуатируемых запасах для отдельных экономических и административных районов; определения подземной составляющей общего речного стока и прогнозирования изменений в речном стоке под влиянием крупномасштабного отбора подземных вод; определения величин непосредственного (прямого) подземного стока в моря и океаны для оценки роли подземных вод в водном и солевом балансе морей. Карта служит основой для широких исследований в области гидрогеологии, гидрологии, условий и закономерностей формирования водных ресурсов и водного баланса, для глобальных гидролого-гидрогеологических обобщений и смежных видов деятельности. Уникальность ее заключается в том, что она позволяет вскрыть, обосновать и проследить основные закономерности формирования подземного стока в глобальном масш-

табе. Разработанная авторами своеобразная легенда Карты наглядно подчёркивает естественно-историческую связь величин подземного стока с физико-географической зональностью, структурно-тектоническими условиями и литологическим составом водовмещающих пород, которая нарушается или затушёвывается в последние годы таким ведущим азональным фактором, как хозяйственная деятельность.

Карта гидрогеологических условий и подземного стока Мира как крупное научное исследование удостоена в 2001 г. Российской академией наук специальной премии имени академика Ф.П. Саваренского.

Наряду с региональными исследованиями подземного стока и ресурсов подземных вод проводились работы по разработке математических моделей водоносных систем. Основные теоретические подходы для постановки региональных задач по геофильтрации и алгоритмы их модельного решения рассмотрены в монографии Н.А. Отильви 1974 г. «Физические и геологические поля в гидрогеологии». Особое внимание в этой работе уделено применению метода конечных элементов для расчёта неустановившейся фильтрации подземных вод в сложных геолого-гидрогеологических условиях.

Значительное развитие в эти годы получили методические подходы применения дистанционных методов в исследованиях подземного стока [9]. Целенаправленное дешифрирование космических снимков в различных спектрах позволяет не только выделить гидрогеологические структуры, но и охарактеризовать их водообильность и качественно оценить масштабы подземного стока и ресурсов подземных вод (Джамалов, Ю.Л. Объедков).

В эти же годы Зекцером и Лебедевой с участием специалистов ГГИ была составлена и опубликована карта водного баланса территории бывшего СССР в масштабе 1:7 500 000, на которой впервые показаны элементы водного баланса (осадки, испарение, речной сток и подземный сток), определённые независимыми друг от друга.

Выполненные в 1970–80-е гг. исследования М.Р. Никитина, Н.П. Ахметьевой по использованию ресурсов солоноватых и солёных подземных вод показали, что такие воды в южных регионах бывшего СССР на площади 3,6 млн. км<sup>2</sup> составляют около 30 км<sup>3</sup>/год, что почти в 1,5 раза превышает ресурсы пресных подземных вод этих террито-

рий. Подземные воды повышенной минерализации (1–35 г/л) представляют важный резерв хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, орошения и обводнения сельскохозяйственных земель. Они могут использоваться как химическое сырьё, так и для питьевого водоснабжения и орошения после искусственного опреснения. Итогом этих работ, помимо карт различного масштаба явились, книга «Ресурсы солоноватых и солёных подземных вод СССР», опубликованная в 1978 г.

Исследования процессов подземного водообмена суши и моря, оценка подземного стока в моря и океаны проводились гидрогеологами ИВП для обоснования отдельных составляющих общего водного баланса и уточнения отдельных аспектов круговорота воды. Без сведений о подземном стоке водный баланс отдельных морей и крупных озёр, а также мировой водный баланс остались незамкнутыми. Приоритет в постановке и развитие широкомасштабных исследований подземного стока в моря в нашей стране и за рубежом принадлежат подразделениям гидрогеологии ИВП. Первые работы в этом направлении были посвящены оценке подземной составляющей водного баланса Ладожского озера и Каспийского моря. В литературе неоднократно отмечалось научное и практическое значение изучения подземного стока и процессов подземного водообмена суши и моря, среди которых приоритетными могут служить: изучение роли подземного стока в общем водном балансе Земли и глобальном круговороте воды, оценка влияния подземных вод на формирование водного и солевого балансов морей и крупных озёр, изучение взаимодействия морских и подземных вод в прибрежных районах, изучение областей разгрузки пресных подземных вод в прибрежных зонах морей с целью их использования для водоснабжения, изучение влияния подземных вод на формирование месторождений полезных ископаемых на дне морей и океанов и роли субмаринного подземного стока в геологических процессах [8; 11].

Под руководством и при непосредственном участии Р.Г. Джамалова в ИВП выполнены исследования подземной составляющей Мирового водного баланса, в результате которых удалось получить дифференцированные оценки подземного стока по отдельным морям и континентам, оценить вынос солей подземными водами и установить общие закономерности формирования и распределения

подземного стока в моря в различных геолого-гидрогеологических и физико-географических условиях. Выполненные исследования являются дальнейшим развитием учения о подземном стоке [7; 27].

Разработана, апробирована и внедрена методика гидрогеологических исследований акваторий морей и крупных озёр, основанная на сочетании гидродинамических методов расчёта подземного притока и натурных экспериментальных работ по изучению процессов разгрузки подземных вод на дне водоёмов (А.В. Месхетели, Зекцер, Джамалов, В.А. Друшциц, Л.М. Тынкова). Впервые создан так называемый морской гидрогеологический комплекс, который по аномалиям температуры и солёности придонного слоя воды, в сочетании с сейсмоакустическим профилированием позволяет количественно оценить приток подземных вод на отдельных участках акватории озёр и морей. Наиболее детальные работы по оценке субмаринного стока проведены по Каспийскому морю (Месхетели, Джамалов, Зекцер). В результате получены оценки подземного водного и солевого притока по отдельным участкам побережья, выделены участки акватории с наиболее интенсивной разгрузкой подземных вод, оценена роль подземных вод в водном и солевом балансах. В последующие годы работы аналогичного характера проведены для отдельных участков береговой зоны Чёрного моря, озёр Иссык-Куль и Балхаш (Месхетели, Д.В. Кузнецова, Друшциц, Г.М. Бертельсон).

Следует особо отметить, что в целом выполненные исследования подземного стока в моря и океаны послужили основой для формирования и становления новой отрасли знаний в области наук о Земле – морской гидрогеологии, тесно связанной с морской геологией, гидрогеологией суши, океанологией и рядом других наук. Предложена понятийная система основных терминов и определений морской гидрогеологии, разработаны методы её исследований, обоснована концептуальная модель взаимодействия подземных вод суши, субмаринных и морских вод.

Установлено, что распределение подземного стока в Мировой океан в глобальном масштабе подчиняется широтной физико-географической зональности, обуславливающей постепенное увеличение удельных значений субмаринного стока от субарктических районов до умеренной зоны, резкое их возрастание во влажных субтропиках и тропиках и снижение в полуаридных и аридных райо-

нах. Местные орографические, геолого-структурные и гидрогеологические особенности прибрежных водосборных площадей усложняют эту общую картину распределения значений субмаринного стока, не нарушая её в целом.

Субмаринный ионный сток существенно влияет на солевой и гидробиологический режим прибрежных частей морей и океанов, процессы биогенного осадконакопления и формирование месторождений полезных ископаемых. Установленная существенная роль поступления солей с подземными водами в Мировой океан (52% привноса солей реками) вносит кардинальные изменения в сложившееся представление о том, что первичная биопродукция океанов и масштабы биогенного осадконакопления лимитируются поступлением солей только с речным стоком.

Интенсивность отжатия субмаринных седиментационных вод при уплотнении осадков контролируется скоростью седиментации и особенностями тектонического строения дна Мирового океана. В связи с этим максимальные удельные и суммарные величины отжимающихся вод наблюдаются в периферийных частях океанов и вдоль срединно-океанических хребтов. Следовательно, закономерное распределение в пределах Мирового океана зон различной интенсивности отжатия седиментационных вод обусловлено взаимодействием циркумконтинентальной, физико-географической и тектонической зональностей.

Региональная количественная оценка подземного водообмена суши и моря позволила замкнуть мировой водный баланс и балансы отдельных морей и озёр и уточнить роль субмаринных подземных вод при решении региональных и глобальных гидролого-гидрогеологических и водохозяйственных проблем. На основании полученных результатов составлены Карта подземного стока в Мировой океан и рассмотренная выше Карта гидрогеологических условий и подземного стока Мира.

Таким образом, полученные значения подземного водообмена суши и моря, основные закономерности этого природного процесса служат основой научного прогноза и изучения условий формирования подземного стока Земли.

Исследования пространственно-временных особенностей формирования режима подземных вод и разработка методических

основ его прогноза проводились под руководством В.С. Ковалевского и были направлены на познание процессов и особенностей изменчивости режима под воздействием природных и антропогенных факторов как основы его прогноза и обоснования рационального использования подземных вод и их охраны.

На массовом материале многолетних наблюдений за режимом подземных вод бывшего СССР и других стран установлены количественные взаимосвязи с изменениями атмосферной циркуляции, серией метеорологических факторов (атмосферными осадками, температурами воздуха, атмосферным давлением, дефицитом влажности воздуха и др.), с гидрологическими и биологическими факторами. В том числе установлены зависимости процессов питания и разгрузки подземных вод от глубин залегания их уровней, характера их сезонного и многолетнего режима. Исследованы проявления квазициклическости в колебаниях уровней подземных вод при чередовании серий маловодных и многоводных лет, региональной и глобальной синхронности и асинхронности режима уровней подземных вод и подземного стока, наличие многолетних линейных и нелинейных трендов, оценена их статистическая значимость. Установлен ряд закономерностей режима подземных вод: его широтная и вертикальная зональность, зависимость амплитуд колебаний уровней и степени инерционности подземных вод от глубин их залегания, фильтрационных и ёмкостных свойств водовмещающих пород и др. Определена и охарактеризована роль различных режимообразующих факторов и условий (климатических, геологических и др.) в формировании режима подземных вод. Итоги этих исследований изложены в монографиях [17; 14; 15].

Исследованные взаимосвязи режима подземных вод с различными режимообразующими факторами, позволили разработать методологию прогнозирования режима уровней подземных вод с различной заблаговременностью. Для каждого региона России установлены предикторы для прогноза основных экстремальных и среднегодовых значений уровней подземных вод с определением оптимальной заблаговременности, достоверности и точности прогнозов, а также сформулировать рекомендации по их составлению. Показана принципиальная возможность составления прогнозов значений уровней и расходов подземных вод с заблаговременно-

стью в 3–6 месяцев при ряде исходных данных [16]. Многолетняя практика составления таких прогнозов показала вполне удовлетворительную их оправдываемость, отвечающую запросам потребителей. Разработаны также методы анализа режима подземных вод как на участках их разведки для водоснабжения, так и на действующих водозаборах [12; 13; 20].

Изучение взаимосвязи между режимом подземных вод и метеорологическими факторами позволили дать оценку возможной изменчивости естественных ресурсов подземных вод и подземного питания рек по бассейну Волги в связи с прогнозируемым изменением климата. Эти исследования показали, что трансформация климата неизбежно скажется на уровнях и расходах подземных вод. В первой четверти 21 в. эти изменения возрастут до 20–40%, т. е. проявятся в виде направленного тренда в сторону увеличения расходов подземных вод. Связано это будет с более тёплыми зимами и увеличением тем самым более растянутого во времени зимне-весеннего питания подземных вод. Подобные ожидаемые изменения в ресурсах подземных вод улучшат условия водоснабжения, т. к. приведут к повышению меженных расходов рек. С другой стороны, следует ожидать увеличения площадей переувлажненных и заболоченных земель, степени подтопленности городов, активизации оползневых, карстово-супфозионных процессов, ухудшения медико-биологической обстановки и др. [14; 19]. Данные прогнозы в определённой степени оказались оправданными, о чём свидетельствуют современные исследования режима и ресурсов подземных вод в лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды ИВП и других родственных организациях.

Установленные законы распределения питания подземных вод и статистические параметры этого процесса позволяют рассчитывать методом Монте-Карло вероятные колебания питания подземных вод заданной обеспеченности на расчётный (прогнозный) период. В прогнозные расчёты запасов подземных вод в моделях следует учитывать такие колебания питания в зависимости от водности лет, а не среднемноголетнее его значение, что приблизит такой расчёт к реальности и повысит его достоверность. Алгоритм таких оценок для различных законов распределения уровней или питания подземных вод разработан Ковалевским и Тынковой [18].

В связи с тем, что подземные воды являются компонентом окружающей среды, необходимо учитывать интенсивные техногенные нарушения гидрологических условий, которые проявляются во взаимосвязанных с ними других компонентах среды. Так, изучение и физическое обоснование подтопления земель, активизации оползней и просадочных явлений, активизации карстово-суффозионных процессов, ущербов речному стоку, ухудшения экологической обстановки и т.д. позволило разработать принципы эколого-гидрологического районирования территории в различных масштабах. В основу такого районирования положены типизация режима подземных вод по условиям его формирования в естественных условиях, а также по степени и характеру нарушенности взаимосвязанной с подземными водами окружающей среды. По этим принципам составлена первая карта эколого-гидрологического районирования РФ. Цель такого районирования – обоснование оптимального и целенаправленного мониторинга подземных вод и взаимосвязанных с ними компонентов окружающей среды, а также программ наблюдений на них. При обосновании размещения сетей мониторинга подземных вод, принималась во внимание необходимость получения по её данным требуемой исходной информации для прогноза режима подземных вод в естественных и нарушенных условиях.

Изучение процессов и закономерностей формирования качества подземных вод в различных условиях и оценка их защищённости от загрязнения проводятся в ИВП в нескольких направлениях: изучение процессов загрязнения подземных вод под влиянием кислых атмосферных выпадений, сельскохозяйственных удобрений и радиоактивных источников; разработка математических моделей миграции и трансформации загрязняющих веществ в насыщенной и ненасыщенной зонах, а также методики региональной оценки и картирования естественной защищённости подземных вод. Натурные и экспериментальные работы по региональной оценке и детальному изучению влияния антропогенной нагрузки на качество подземных вод уже в течение многих лет проводятся в центральных районах Европейской части России. В частности, многолетние исследования в Московском регионе позволили установить, что в условиях интенсивной техногенной нагрузки на окружающую среду формируются новые дополнительные очаги питания и загрязнения

подземных вод, что приводит к резкому сокращению темпов водообмена (до 2–5 лет вместо 100) в эксплуатируемых водоносных горизонтах и увеличению концентраций основных солей и микроэлементов. Существенное изменение гидрогеологических условий вызывает в отдельных районах активизацию карстово-суффозионных процессов, скорость которых в 50–100 раз превышает их естественную интенсивность [12].

Изучение снегового покрова, поверхностных, почвенных и грунтовых вод в центральных и северо-западных районах Европейской части РФ позволило установить региональное воздействие кислых атмосферных выпадений на формирование современного гидрогеохимического режима подземных и поверхностных вод. В результате установлено, что на огромных территориях северо-западных регионов РФ и прилегающих стран произошла смена естественного гидрокарбонатного состава грунтовых вод на сульфатный, а величина pH в отдельных случаях снижается до 4,5–5. При таком закислении грунтовых и почвенных вод создаются благоприятные условия для миграции тяжёлых металлов и их поступления в водоносные горизонты. В связи с тем, что эти процессы имеют региональный характер, основное внимание во всём мире уделяется оценке буферных (нейтрализующих) свойств почв и пород зоны аэрации в целом. Наши исследования в этой области позволяют предложить для оценки этих свойств соотношение между ионами сульфата кальция и магния. Этот показатель позволяет судить о наличии и направленности процессов закисления природных вод даже при постоянных значениях pH.

Загрязнение грунтовых вод органическими и минеральными удобрениями изучалось на примере водоохранной зоны Иваньковского водохранилища. Основная задача – оценка загрязнений биогенными веществами почвенных и грунтовых вод, а также их вынос с подземным стоком в водохранилище. При решении этих задач рассматривалось влияние сорбции и десорбции, нитрификации и денитрификации на интенсивность проникновения нитратов, аммония, фосфора и калия до уровня грунтовых вод. Установлено, что основным компонентом загрязнения грунтовых вод служат нитраты, миграционная способность которых существенно зависит от количества органического вещества в почвах, их кислотности и песчанистости. На примере водоохранной зоны Иваньковского водо-

хранилища показано, что поступление азота в водохранилище с грунтовым стоком превышает его вынос с поверхностным [6].

Учитывая большую опасность и региональный характер радиоактивного загрязнения природной среды, большое внимание в исследованиях ИВП уделено разработке концепции радиологического мониторинга гидросферы (МГС) [17]. Актуальность этой проблемы обусловлена всё более увеличивающейся техногенной нагрузкой на природную среду, в связи с чем подземные воды нередко становятся наиболее защищённым компонентом среды и источником водоснабжения.

В последние годы значительное место в исследованиях принадлежит разработке и применению математических моделей для оценки и прогноза изменения качества подземных вод под влиянием различных источников загрязнения. При этом приоритетными служат модели, которые позволяют описывать перенос и трансформацию загрязняющих веществ как в зоне аэрации, так и в насыщенном потоке с учётом проявления защитных свойств водовмещающих пород и других компонентов системы.

Основной особенностью разрабатываемого подхода является возможность учёта в моделях неоднородности пространственного распределения фильтрационных и литолого-геохимических характеристик системы. Совместное влияние этих факторов может быть определяющим при формировании ареала загрязнения в гидрологической системе. Включение их в модель позволяет повысить точность прогнозной оценки времени защищённости подземных вод как фактор времени появления загрязняющего вещества в опасных концентрациях на охраняемом объекте. Данная модель позволяет оценить не только время появления загрязнения для некоторых средних природных условий, но и вероятность быстрого прорыва в связи со случайным пространственным распределением фильтрационных параметров среды.

Существующие методики региональной оценки защищённости подземных вод основаны главным образом на качественном или полуколичественном учёте различных факторов, определяющих условия существования водоносной системы в пространстве и во времени (DRASTIC, GOTит.д.). В связи с этим указанные подходы отличаются существенной неопределенностью, дают качественное пред-

ставление о степени уязвимости подземных вод и их ресурсов и не обеспечивают возможность обоснованных прогнозных оценок. В связи с этим предлагается методика оценки защищённости подземных вод, исходя из действительной скорости поступления консервативных загрязнений в водоносный горизонт или до защищаемого объекта. Указанная методика позволяет оценить время поступления загрязняющих веществ в заданной концентрации в расчётную точку при различных условиях в зависимости от мощности и литологического состава пород зоны аэрации, а также фильтрационных характеристик эксплуатируемого водоносного горизонта. При этом скорость продвижения фронта загрязнения или время достижения расчётной точки оценивается в терминах вероятностей с учётом степени неопределённости в исходной информации о системе.

Авария на Чернобыльской АЭС показала, что подземные воды уязвимы к радиоактивному загрязнению. В связи с этим разработана методика оценки естественной защищённости подземных вод от радиоактивного загрязнения. При этом показано, что естественная защищённость подземных вод к этому виду загрязнения имеет свою особенность, обусловленную тем, что именно почвы, как наиболее активный слой зоны аэрации, способны связать большее количество радионуклидов. В связи с этим предлагается верхнюю защитную зону, отделяющую подземные воды от поверхностного загрязнения рассматривать как двухъярусную систему: первый слой – почвы, второй – породы зоны аэрации. Для оценки и картирования защищённости предлагается расчётное уравнение времени миграции загрязняющего вещества через защитную зону, учитывающее движение фронта инфильтрационных вод и задержку – сорбцию загрязняющего вещества породой, что по существу соответствует предварительному прогнозу миграции загрязнения. По разработанной методике А. П. Белоусовой проведена оценка защищённости и уязвимости грунтовых вод от радиоактивного загрязнения в Брянской, Тульской и Калужской областях [3; 5].

#### **Направления исследований в области гидрогеологии после 2000 г.**

Рассмотренные выше направления получили развитие с учётом произошедших в стране и мире природно-климатических и социально-экономических изменений.

Оценка многолетних изменений подземного стока и ресурсов подземных вод при климатических вариациях. В условиях глобального потепления основное внимание уделяется развитию методов оценки ресурсов и режима подземных и поверхностных вод при вероятных сценариях изменений климата и антропогенных воздействий. При региональной оценке современных величин подземного стока и возобновляемых (естественных) ресурсов подземных вод особое место занимают исследования изменения величин питания подземных вод при нестационарном климате. В последние годы гидрогеологами ИВП совместно со специалистами кафедры гидрологии МГУ выполнена оценка и проведён анализ изменений характеристик годового, меженного и минимального месячного стока рек Европейской части РФ (ЕЧР) за последние 35 лет (до 2012 г.) в сопоставлении с предыдущими периодами наблюдений. Исследованы генезис стока для разных бассейнов рек и выявлены основные причины современных изменений стоковых характеристик. Установлены региональные закономерности гидролого-гидрологических процессов и проведено районирование территорий Европейской России по особенностям формирования подземного и поверхностного стока. Проведена переоценка возобновляемых (естественных) ресурсов поверхностных и подземных вод за 1978–2012 гг. с построением соответствующих карт. Выполнен анализ водообеспеченности и нагрузки на водные ресурсы.

Изменения климата уже привели к существенным изменениям водного режима и условий формирования водных ресурсов в ряде крупных регионов. Рост средних годовых и особенно зимних температур воздуха в совокупности с атмосферными осадками оказали значительное влияние на водность рек и режим подземного и поверхностного стока. Пространственно-временные распределения средних годовых, меженных и минимальных характеристик стока практически всех речных водосборов ЕЧР использованы как показатели возобновляемых водных ресурсов подземных и поверхностных вод по речным бассейнам и субъектам РФ. Для визуализации и анализа распределения полученных величин водных ресурсов и ряда других параметров построены карты с использованием ГИС-технологий [1; 23].

Изучены современные гидролого-гидрологические условия ЕЧР. Для пространственно-временного анализа изменений условий

формирования и динамики водных ресурсов с 1945 по 2012 г. собраны материалы почти по 350 водосборам ЕЧР, выбранным в качестве репрезентативных. Для этих водосборов рассчитаны среднемноголетние значения и коэффициенты вариации годовых и минимальных месячных расходов воды зимней и летней межени, коэффициента естественной зарегулированности стока и проведена проверка статистической однородности рядов.

На основе совместного анализа стоковых характеристик для 60 репрезентативных бассейнов средних рек, сезонных осадков и температуре приземного воздуха для 200 метеостанций в пределах ЕЧР установлено, что 1978–82 гг. характеризуются как пороговые начала изменений формирования стока под влиянием климатических условий. Увеличение числа, продолжительности и «глубины» оттепелей, общее сокращение длительности холодного периода года служат причиной уменьшения глубины промерзания зоны аэрации и соответствующего увеличения инфильтрационного питания подземных вод. Практически для всех водосборов фиксируется сокращение доли стока за половодье и увеличение меженных расходов воды, что меняет форму и общий вид гидрографа стока. В результате сложившейся климатической ситуации создались в целом благоприятные условия для формирования подземного стока и возобновляемых ресурсов.

Показано, что распределение величин ресурсов подземных вод на территории ЕЧР определяются тремя основными природными факторами: климатическими, ландшафтно-орографическими и гидрогеологическими (состав и фильтрационные свойства водовмещающих пород и зоны аэрации, глубина залегания подземных вод, степень дренированности), что наиболее отчётливо проявляется на малых водосборах и неглубоких водоносных горизонтах.

В последние годы происходят радикальные изменения условий формирования речного стока и его режима, сопровождающиеся значительным снижением неравномерности внутригодового распределения, увеличением подземной и частично поверхностной составляющих речного стока. Эти процессы носят региональный характер, что в конечном итоге приводит к значительному увеличению естественной зарегулированности стока.

Изменение величин возобновляемых (естественных) ресурсов подземных вод, которые обычно эквивалентны меженому стоку, отмечается для большинства рек ЕЧР. В начале 21 в. модули меженного (подземного) стока рек и, соответственно, естественные ресурсы подземных вод ЕЧР возросли в среднем на 40–60 % по сравнению с величинами до середины 1970-х гг. Положительные значимые тренды (при уровне 95 %) стока зимней и летне-осенней межени характерны для бассейнов верхней и средней Волги, Оки, большей части бассейна Урала.

Изменения минимального месячного стока и соответствующих ресурсов подземных вод в среднем составляют 1–2 л/(с·км<sup>2</sup>). Наиболее существенное увеличение минимальных ресурсов (50–70%) происходит в верхнем течении Оки, среднем течении Волги, в бассейне Урала в верхнем течении Дона. К югу от этой полосы (устье и среднее течение Дона, Предкавказье) рост минимального стока менее значителен (до 15%) вплоть до его снижения.

Актуальность выполненных исследований постоянно возрастает в связи с сохраняющейся нестационарностью климатических характеристик. В результате установлено, что наиболее значимые изменения условий формирования водных ресурсов связаны с подземной составляющей речного стока (меженный и минимальный месячный сток), которая служит лимитирующим фактором водообеспечения территорий.

Основные результаты проведенных исследований:

- выявлены вариации годового, меженного и минимального стока рек, которые свидетельствуют о существенных изменениях в многолетних колебаниях водных ресурсов;
- установлено существенное увеличение средних меженных и минимальных месячных расходов воды;
- для большинства рек произошли изменения в генезисе их питания, обусловившие изменение режима половодья, его сроков и максимальных расходов, а также значимое увеличение меженного стока, прежде всего, за счет подземных вод. Это приводит к уменьшению максимальных расходов весеннего половодья, уменьшению доли стока за половодье и увеличению расходов воды за летне-осенний период;

- установлено увеличение естественной зарегулированности стока – важнейшего фактора устойчивого водопользования, его безопасности и надёжности;
- естественные ресурсы подземных вод высокой обеспеченности служат лимитирующим фактором при неограниченном сроке их эксплуатации;
- на территории ЕЧР в первой половине 21 в. следует ожидать увеличения водных ресурсов и уменьшения их внутригодовой неравномерности. Однако для южных регионов РФ сохранится дефицит водных ресурсов.

Показано, что обоснованные региональные оценки могут быть получены при наличии продолжительных гидрологических наблюдений не только путём расчленения наблюдённых гидрографов речного стока на генетические составляющие, но и осреднения величин стока за меженные периоды. Выбор периода осреднения меженных расходов для различных регионов проводился на основе генетического расчленения гидрографов рек по методике Куделина и сравнения полученной величины подземной составляющей с различными характеристиками меженного стока. В результате проведенных расчётов для ряда рек РФ выполнена:

- оценка временной изменчивости генетических составляющих стока рек в различных ландшафтно-климатических зонах;
- оценка изменения соотношения источников питания рек в различные фазы гидрологического года;
- оценка связи составляющей стока с климатическими стокообразующими параметрами за различные временные интервалы.

На примере ЕЧР выполнены оценки масштаба и степени современных изменений подземной и поверхностной составляющей речного стока. Выявлены закономерности современного распределения и изменения водных ресурсов для ЕЧР и бассейнов отдельных рек, которые определяют условия водопользования в разных регионах страны.

Таким образом, в последние годы происходят существенные изменения условий формирования многолетнего, годового и сезонного стока и его режима, сопровождающиеся значительным снижением неравномерности внутригодового распределения, увеличением подземной и уменьшением поверхностной составляющих речного стока.

## **Разработка математических моделей фильтрации грунтовых вод и миграции загрязняющих веществ в насыщенно-ненасыщенной среде (А.Ю. Беляев).**

Связующим направлением исследований для рассмотренных выше современных задач в области гидрогеологии служит разработка математических моделей и численное моделирование процессов фильтрации подземных вод и миграции загрязняющих веществ в насыщенно-ненасыщенной зоне. Показано, что гетерогенность и анизотропия фильтрационной среды служат ведущими факторами в процессах движения подземных вод, обтекания препятствий и в конечном итоге времени добегания до расчётного горизонта. При этом разработана, апробирована и доведена до практического применения модель сорбции-десорбции загрязняющих веществ в органогенно-глинистых отложениях. Рассмотренные задачи в такой постановке могут служить основой для разработки аналитических решений и численных моделей оценки защищённости подземных вод в зависимости от концентраций загрязняющих веществ на входе в систему, скорости фильтрации и времени добегания до расчётной точки.

Разработана методика оценки изменений уровня грунтовых вод (УГВ) при отсутствии или недостатке данных, необходимых для непосредственного решения фильтрационных задач. Описан эффект немонотонной зависимости скорости процесса восстановления УГВ от коэффициентов фильтрации грунта, подстилаемого высоко проводящими песчаными породами.

Рассмотрена проблема строгого обоснования оценок и выводов, полученных с помощью упрощённых моделей для решения фильтрационных задач с реальным, но неизвестным распределением параметров. Эта проблема связана со свойством монотонности решений уравнений по параметрам. Монотонность зависимости решений нестационарных фильтрационных задач от распределения коэффициентов фильтрации не является очевидной. Тем не менее, на достаточно больших временах процесса фильтрации монотонность всё-таки имеет место, т.е. чем больше коэффициенты фильтрации, тем быстрее происходят изменения УГВ. В результате обосновано это качественное свойство решений уравнений фильтрации. Выполнена реализация ситуаций, когда для неоднородных

грунтов с меньшей проницаемостью процесс подъёма УГВ может происходить быстрее, чем для более проницаемого грунта. Это решение имеет отношение к процессу обводнения торфяников, у которых подстилающим для торфа слоем служит высокопроницаемый водонасыщенный песчаный грунт.

Описанные теоретические положения применены к гидрогеологическим проблемам, возникающим при обводнении болотных массивов способами, предполагающими возможность активного регулирования УГВ. Разработана методика, позволяющая давать строго обоснованные оценки эффективности такого регулирования при отсутствии или недостатке данных, необходимых для непосредственного решения фильтрационных задач.

**Изучение болотных массивов как естественных барьеров при миграции загрязняющих веществ и при интенсивном антропогенном воздействии (пожары и обводнение) (Н. П. Ахметьева)**

В связи с охраной подземных вод как компонента окружающей среды, особое внимание уделяется изучению болотных массивов как естественных барьеров на пути миграции загрязняющих веществ и интенсивном антропогенном воздействии. В результате натурных и лабораторных экспериментов уточнены направленность и масштабы деградации органического вещества и торфов при пожарах на болотах. Показано, что эти процессы сопровождаются изменением не только вещественного состава, но и гидрофизических и экологических свойств болотных отложений. Кроме того, наблюдения на болотных массивах в разной степени подверженных пожарам позволили выделить различные стадии восстановления болотной растительности и регенерации органического вещества и заторфованности отложений. При данных исследованиях рассматривались различные схемы и методы обводнения болотных массивов в качестве профилактического мероприятия от их возгорания. Установлено, что в зависимости от строения самого болотного тела и фильтрационных характеристик подстилающих пород режимы обводнения и методика их осуществления могут быть различны. Полученные результаты апробированы на болотах Рязанской и Тверской областей.

Проведённые исследования показывают, что восстановление химического состава болотных вод происходит достаточно быстро.

Однако, направление, в котором будут происходить дальнейшие изменения территории выгоревших болот – по пути восстановления торфяного болота или развития нового ландшафта (заболоченного луга или леса) – определить пока невозможно. Ответ на этот вопрос потребует изучения условий обводнения территории (как естественного, так и антропогенного), развития почвенного и растительного покрова, а также характера микробиологических процессов.

**Изучение влияния интенсивной эксплуатации подземных вод  
Московского региона на их гидрографический и  
гидрохимический режимы (В.Л. Злобина).**

Проанализированы многолетние данные пространственно-временных особенностей гидрографического и гидрохимического режима подземных вод Московского региона за 1957–2015 гг. Особое внимание уделялось территориям, характеризующимся стабильными снижениями пьезометрических напоров в эксплуатируемых водоносных горизонтах. Характер амплитуд изменения пьезометрических уровней сопоставлялся с особенностями формирования гидрохимических типов подземных вод. Термодинамическим моделированием установлено, что выщелачивание и комплексообразование являются приоритетными в гидрохимических процессах в водоносных горизонтах. Для ряда основных химических элементов и соединений ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и др.) установлены взаимосвязи с изменением режима эксплуатации подземных вод в средне- и нижнекаменноугольных водоносных горизонтах. В результате обобщений установлено изменение условий естественной защищенности подземных вод при загрязнении природной среды.

Учитывая дефицит ресурсов подземных вод во многих субъектах центральной части Европейской России, исследованы различные режимы отбора подземных вод, включая оценку воздействия на окружающую среду так называемой переэксплуатации подземных вод на различных месторождениях, в том числе твердых полезных ископаемых. В результате постоянного водоотбора многие горизонты подземных вод в пределах Московского региона и сопредельных областей оказались осушены. В связи с этим данные территории продолжают испытывать водный дефицит. Наряду с оценкой воздействия отбора на геологическую среду выполнены расчёты по

ущербу речному стоку и активизации выщелачивания водосодержащих известняков с активизации процессов карстообразования. Показано, что в этом случае ведущим фактором служит недонасыщенность или агрессивность водных масс по отношению к основным водосодержащим минералам (известняк, доломит, гипс и др.). В результате в центральных районах Европейской России практически нет пресных подземных вод, удовлетворяющих стандартам на питьевую воду, за счёт их постоянного загрязнения стабильным стронцием, фтором, литием, а также в верхней части разреза – кадмием и даже мышьяком.

**Оценка перспектив использования ресурсного потенциала  
пресных подземных вод с целью повышения  
водообеспеченности различных регионов страны.  
(Зекцер, А.В. Дзюба).**

Для описания пространственно-временных закономерностей многолетних изменений метеорологических характеристик, определяющих ресурсы подземных вод на территории РФ, использована методика расчёта композиции статистических оценок трендов 1-го и 2-го порядков, основанная на статистических испытаниях.

Рассмотрение влияния лишь отдельных атмосферных переменных на подземные воды предопределяет неучёт синергетического эффекта, формирующегося при воздействии ансамбля климатообразующих факторов. Тем самым снижается уверенность в получаемых результатах. Важнейшие климатоформирующими факторами являются концентрация в воздухе термодинамически активных газов, температура и влагосодержание слоя взаимодействия (приземного слоя воздуха и зоны аэрации). Важнейшие свойство этих характеристик – их континуальность по пространству и времени. В отличие от влагосодержания атмосферы, атмосферные осадки квантованы по пространству и времени и лишь отчасти характеризуют интенсивность и направление влагообмена между атмосферой и зоной аэрации. К тому же статистически и физически значимые неопределённости, возникающие при анализе атмосферных осадков последних десятилетий, осреднённых по регионам РФ, обусловлены неодинаковой презентативностью данных наблюдений. Достоверность линейного приближения многолетнего роста содержания  $\text{CO}_2$  в тропосфере 99%. Коэффициент линейной аппроксимации

ции увеличения концентрации метана в тропосфере в течение последних десятилетий также близок к 0,99. Рост температуры приземного воздуха в интервале 1936–2014 гг. в большинстве регионов РФ (кроме южных районов) характеризуется статистически значимым положительным линейным трендом на 0,05 уровне. Однако авторы полагают, что для описания многолетних регионально осреднённых атмосферных осадков в интервале 1936–2011 гг. предпочтительна модель стационарного ряда с присущей ему естественной изменчивостью. Накопленный эмпирический материал о многолетних изменениях климатических переменных не позволяет надёжно оценить величину изменения ресурсов подземных вод в результате именно климатических девиаций. В настоящее время невозможно сформулировать обоснованное суждение о климатической чувствительности и уязвимости ресурсов подземных вод в масштабе времени порядка нескольких десятилетий.

**Исследование трансформации качества подземных вод под  
влиянием природных и антропогенных факторов**  
(А.П. Белоусова).

Развиты научные основы концепции экологического мониторинга подземных вод при диффузном и точечном загрязнении окружающей среды для объектов нефтегазовой промышленности и атомных станций. Предложенная структура мониторинга может быть общей для всех точечных и диффузных источников загрязнения. В связи с влиянием таких объектов как источников загрязнения на окружающую среду мониторинг должен быть комплексным, включающим наблюдения за всеми компонентами окружающей среды (атмосфера, литосфера, гидросфера, биосфера, техносфера). При этом предложенная система мониторинга исходит из того, что АЭС приводят к нарушению геологических, геохимических и экологических условий на прилегающих к АЭС территориях, а при авариях на АЭС – к загрязнению огромных территорий (Чернобыльская АЭС – ЧАЭС). Важным аспектом таких наблюдений и исследований служит оценка степени защищённости и уязвимости подземных вод и особенно грунтовых вод к загрязнению чернобыльскими радионуклидами. Методика среднемасштабной оценки защищённости и уязвимости подземных вод к загрязнению разработана и апробирована на нескольких регионах страны. Эта оценка позволит

корректировать размещение наблюдательной сети (связь с подсистемой наблюдений) на изучаемом объекте. [4]

Оценка целесообразности применения искусственного восполнения для удовлетворения перспективной потребности в воде. Показано, что при искусственном восполнении пресных подземных вод в Краснодарском крае целесообразно использовать соотношение 45% поверхностных вод р. Кубань и 55% подземных вод краснодарского водоносного горизонта. С другой стороны, наиболее целесообразными соотношениями при смешивании поверхностных и подземных вод в Республике Калмыкия будут 69% поверхностных вод р. Яшкуль и 31% подземных вод ергенинского водоносного горизонта. Аналогичные соотношения обоснованы для других месторождений подземных вод.

Среди основных задач дальнейших исследований в области гидрогеологии в ИВП следует выделить: развитие научно-методических основ оценки современного состояния и прогноза поземного стока и возобновляемых ресурсов подземных вод в изменяющихся естественных и антропогенных условиях; разработка и совершенствование математических моделей для численных экспериментов фильтрации подземных вод и миграции различных загрязняющих веществ; оценки взаимодействия подземных и поверхностных вод для уточнения вклада различных генетических составляющих речного стока; оценка изменений качества подземных вод и их загрязнений с учётом климатических вариаций и антропогенных воздействий; изменений ресурсов подземных и поверхностных вод отдельных регионов и водосборов РФ для разработки оптимального режима возможного использования водных ресурсов при различной нагрузке; исследование условий использования ресурсов подземных вод и оценка их защищённости в регионах РФ с интенсивной хозяйственной деятельностью.

Сотрудники лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды занимаются педагогической деятельностью, в течение многих лет преподают в различных университетах курсы «Гидрогеологии», «Геэкологии» и «Охраны окружающей среды». Ими подготовлены и изданы учебники по этим дисциплинам. В частности, Белоусова является соавтором известного учебника «Экологическая гидрогеология: Учебник для вузов. – М.: ИКЦ «Ака-

демкнига», 2006. 397 с., Джамалов – автор учебника по «Инженерной геоэкологии. Основы гидрогеологии, инженерной геологии, геокриологии», Дубна, 2016. 505 с.

Результаты научных исследований опубликованы в многочисленных монографиях, сборниках трудов, отдельных статьях. Краткий список основных публикаций приведен ниже.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России // Под ред. Р.Г. Джамалов, Н.Л. Фролова. М.:ИВП РАН, 2015, 96 с.;
2. Ахметьева И.П., Лола М.В., Горецкая А.Г. Загрязнение грунтовых вод удобрениями. М.: Недра, 1991. 99 с.;
3. Белоусова А.П. К методике оценки естественной защищенности подземных вод от радиоактивного загрязнения // Водные ресурсы. 1993;
4. Белоусова А.П. Мониторинг подземных вод в районах расположения АЭС. Разведка и охрана недр. №4, 2015. С. 65–71.
5. Белоусова А.П. Оценка защищенности подземных вод от загрязнения радионуклидами // Вода: химия, экология. №5, 2012. С. 11–17.
6. Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В. Экологическая гидрогеология: Учебник для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 397 с.
7. Джамалов Р.Г., Месхетели Л.В., Подземный водообмен суши и моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 207 с.;
8. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Месхетели А.В. Подземный сток в моря и Мировой океан. М.: Наука, 1977. 94 с.;
9. Джамалов Р.Г., Объедков К.Л. Гидрогеологическое районирование при прогнозной оценке ресурсов подземных вод по космоснимкам // Оценка и рациональное использование ресурсов подземных вод. М.: Наука, 1980. С. 129–139;
10. Зекцер И.С. Закономерности формирования подземного стока и научно-методические основы его изучения. М.: Наука, 1977. 173 с.;
11. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г., Месхетели Л.В. Подземный водообмен суши и моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 207 с.;
12. Злобина В.Л. Влияние эксплуатации подземных вод на развитие карстово-суффозионных процессов. М.: Наука, 1986. 133 с.;
13. Ковалевский В.С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией. М.: Недра. 1986. 200 с.;
14. Ковалевский В.С. Многолетние колебания уровней подземных вод и подземного стока. М.: Наука, 1976. 200 с.;
15. Ковалевский В.С. Многолетняя изменчивость ресурсов подземных вод. М.: Наука. 1983. 205 с.;
16. Ковалевский В.С. Основы прогнозов естественного режима подземных вод. М.: Стройиздат, 1974. 204 с.;
17. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 153 с.;

18. Ковалевский В.С., Гынкова Л.М. Прогнозная оценка вероятной изменчивости питания подземных вод в будущем при решении задач водоснабжения // Водные ресурсы. №3, 1993.
19. Ковалевский В.С., Максимова Н.Г. Прогнозная оценка естественных ресурсов подземных вод в ближайшем будущем // Водные ресурсы. №2, 1938. С. 41–49;
20. Ковалевский В.С., Медовар Ю.А. К методике учета гидрологических показателей при обосновании оптимальной отметки НПУ водохранилища // Водные ресурсы. №1, 1989. С. 162–165;
21. Подземные воды Мира: ресурсы, использование, прогнозы. Издание «Наука», 2007. 36 п.л;
22. Подземный сток Центральной и Восточной Европы. М.: ВСЕГИНГЕО., 1982. 288 с.;
23. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России // Под ред. Р.Г. Джамалов, Н.Л. Фролова. М.: ГЕОС, 2015. 320 с.
24. Groundwater Resources of the World and Their Use (International Mono-graph), UNESCO, Paris, 2004, 36 п.л;
25. Role of Ground Water in the Hydrological Cycle and in Continental Water Balance / VPrepared by I.S. Zektser and R.G. Dzhamalov. UNESCO International Hydrological Programme IHP-III Project 2.3. Unesco Paris: 1988. 138 p;
26. World Map of Hydrogeological Conditions and Groundwater Flow, scale 1:10 000 000, Hydroscience Press, USA, 1999;
27. Zektser I., Dzhamalov R. Submarine Groundwater, CRC Press, USA, 2007. 466 p.

# **Оценка современного состояния водообеспеченности района западных подстепных ильменей**

*П.И. Бухарицин*

## **Введение**

Одной из стратегических целей водного законодательства Российской Федерации является гарантированное обеспечение водными ресурсами устойчивого социально-экономического развития регионов. Достижение этой цели в различных отраслях экономики тесно связано с развитием водохозяйственной системы речного бассейна. Это возможно лишь при совершенствовании системы управления. При этом необходимо учитывать особенности формирования водных ресурсов конкретной территории.

Развитие и функционирование водного хозяйства в настоящее время происходит не в стационарной природной среде. Непосредственное воздействие хозяйственной деятельности на водные объекты достигло таких масштабов, что эти объекты изменяются под влиянием антропогенных причин быстрее, чем удается изучить эти изменения и принимать соответствующие водоохраные меры.

После создания каскада водохранилищ на Волге наиболее трудно разрешимой проблемой стало регулирования стока воды в её нижнем течении. В современных условиях требования различных водопользователей этого региона существенно отличаются, порой противоречивы.

Астраханская область имеет свои особенности формирования водных ресурсов. При практически полном отсутствии запасов подземных вод, в условиях аридного климата, река Волга, её рукава и протоки являются единственным источником водоснабжения на бытовые и хозяйствственные нужды для 1 млн населения области.

Сложностью управления водохозяйственной системой Нижней Волги является её многофункциональность. Современные рыночные отношения формируют экономику региона, но каждая отрасль народного хозяйства добивается приоритета, преследуя свои собственные цели и выбирает методы и способы приемлемые и более выгодные для неё. При этом забывая, что Волга и дельта – это единый живой организм, единый природный комплекс.

## **Объект исследований, его положение, границы, значение**

Значимость отдельных природных комплексов в устьевой области Волги в социально-экономическом развитии региона неоднозначна. В потребностях водных ресурсов каждый из них имеет свои особенности.

Одним из крупнейших и значимых экономических районов являются Западно-подстепные ильменьи (ЗПИ), расположенные на юго-востоке дельты Волги, они занимают площадь в 4300 тыс. км<sup>2</sup> с населением более 100 тыс. человек. Основные поселения расположены вдоль ильменей, которые с древних времён были объектом ловли рыбы, ведения сельского хозяйства, получения соли. Главным системообразующим фактором всей территории ЗПИ является водный сток реки Волги.

Средняя многолетняя приточность воды в ЗПИ составляла 4,4 км<sup>3</sup>, а оттока 2,2 км<sup>3</sup> (1940–55 гг.). В последние годы приточность снизилась до 2,6 км<sup>3</sup>, а в 1996 г. – всего 0,76 км<sup>3</sup>, отток – 1,5 км<sup>3</sup>. Средние глубины уменьшились до 1,0–0,5 м, увеличилась площадь зарастания, ухудшилось качество воды, что стало первостепенной проблемой для почти 100-тысячного населения этого района, других источников пресной воды район ЗПИ не имеет. В большую часть ильменей вода поступает в половодье из основных водотоков дельты: с основного русла Волги, рук. Бахтемир, крупного протока Хурдун и 20 более мелких проток, а также по семи государственным системам – Бежскульскую, Дарминскую, Прикаспийскую оросительные системы, Восточенскую, Камышевскую, Зареченскую, Лиманскую водные системы, которые обеспечивают подпитку водой ильменьи для орошения сельскохозяйственных угодий и обводнения населённых пунктов. В другие ильменьи вода подкачивается насосными станциями. Для предотвращения обратного стока воды в межень часть ильменей перекрывают земляными дамбами.

Поданным космосъёмки в маловодном 1991 г. (159,4 км<sup>3</sup> за IV–VI), на пике половодья при расходе воды 30000 м<sup>3</sup>/сек площадь затопления ЗПИ составляла около 50%. В маловодные (в 2006 г. – 99,3 км<sup>3</sup>) и средневодные годы (2004 г. – 105,9 км<sup>3</sup>) заливаемость снижалась до 35–40% и многие ильменьи пересохли. Сложная ситуация сложилась в половодье 2011 г., которое оказалось крайне маловодным – около 77 км<sup>3</sup> (апрель–июнь). Водообеспеченность резко снизилась, до большей

Таблица 1

## Уловы рыб по годам в ЗПИ

Виды рыб	Уловы по годам, в тоннах					
	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Сазан	0,3	2,7	0,171	0,131	0,113	—
Судак	0,513	0,3	—	—	—	—
Сом	1,401	1,0	—	—	—	—
Лещ	5,246	4,26	1,624	1,038	5,374	—
Шука	0,425	1,13	0,03	0,122	4,088	—
Жерех	—	0,1	—	—	—	0,729
Толстолобик	0,109	0,5	—	2,685	—	0,483
Белый амур	0,1	—	—	—	—	—
Линь	0,254	0,517	—	0,053	0,765	7,203
красноперка	3,41	5,029	0,342	8,292	1,846	16,4
Карась	35,366	47,39	3,541	2,483	1,618	16,309
Окунь	0,446	1,027	0,147	0,689	1,088	2,618
Густера	1,405	9,603	0,136	1,263	—	2,292
Синец	—	—	0,01	0,379	—	—
Вобла	0,012	0,5	1,164	—	—	—
ВСЕГО	48,987	74,05	7,165	17,13	16,75	46,034

части ильменей вода просто не дошла, а остальные были залиты на 30–35%.

На основе анализа космических снимков установлено, что на пике и начале спада средних и высоких половодий площадь водной поверхности составляет соответственно 25% и 35% от общей площади ильменей, а в летнюю- осеннюю уменьшается до 11%.

Рыбохозяйственный фонд ЗПИ включает 278 ильменей площадью более 80 тыс. га, из них около 20 тыс. га непосредственно прилегают к Волге и рук. Бахтемир и являются ценными нерестилищами полу-проходных рыб. Ихиофауна ЗПИ представлена почти всеми видами рыб Волго-Каспийского бассейна. Распространение рыб по ильменям обусловливается особенностями водоёмов и уровнем приспособленности рыб к условиям обитания (гидрологическим, гидрохимическим факторам, условиям питания).

В ильменях в 2010 г. было выловлено 46 т. рыб (табл. 1).

Снижение объёмов воды, ухудшение её циркуляции, зарастание ильменей привело не только к снижению рыбопродуктивности, но и к потере нерестилищ, их обсыханию. В результате изменился

видовый состав рыб, исчезают ценные виды – судак, жерех, сазан, а их нишу занимают краснопёрка, карась, линь (табл. 1). Гидрологическая обстановка в ЗПИ ухудшается не только в результате снижения естественного водного стока. Немаловажной причиной является антропогенная деятельность. Данный регион играет немаловажную роль в социально-экономическом развитии Астраханской области. Но несовпадающие интересы частных арендаторов, использующих земли, кто в целях рыбоводства, кто для сельского хозяйства, а коммунальных служб для водообеспечения населения приводят к тому, что наблюдается стихийное, самостоятельное регулирование стока воды, а в некоторых случаях даже перекрывается подача воды в соседние ильмени.

Оросительные системы построены в советское время, их техническое состояние крайне неудовлетворительно. Многие современные небольшие дамбы возведены незаконно. По данным «Службы природопользования и охраны окружающей среды Астраханской области», насчитывается более 200 гидротехнических сооружений, собственники которых не установлены.

Пропускная способность водогонных каналов зависит от их ширины и глубины, однако в настоящее время суммарное поперечное сечение сильно уменьшилось в результате хозяйственной деятельности (прокладка транспортных магистралей, дамб) и природных факторов (затопление, зарастание растительностью, малые глубины).

В конечном итоге ильмени засоляются и в результате даже прилегающие к водному тракту земли постепенно осолоняются, увеличивая площади солончаков. Самая южная и многочисленная группа ильменей снабжается водой по Прикаспийскому водному тракту самотёком в период половодья. Но антропогенная деятельность в сумме с природными процессами нарушила пропускную способность воды по каналам. В результате ряд ильменей прекратил своё существование, а остальные испытывают дефицит воды. Вода в ильменях не пригодна к использованию, т.к. её минерализация составляет от 5–10 г/л в слабопроточных до 55 г/л в непроточных ильменях.

В результате, массовое и бесконтрольное строительство и эксплуатация малых гидротехнических сооружений на ильменях усу-

губляет негативные последствия зарегулирования стока Волги и сдерживает поступление воды в зону ЗПИ. Ослабление или полное отсутствие контроля за сооружениями и их эксплуатацией, самовольная ликвидация приводят к ухудшению положения не только в местах их нахождения, но и на соседних водоёмах.

Следовательно, на общую гидрологическую ситуацию в районе ЗПИ влияет комплекс факторов – природных (водный сток, климат и гидрологоморфометрические особенности территории) и антропогенные (управление, хозяйственное назначение, технологии и прочие), как отмечает В.Г. Пряжинская «важнейшим элементом устойчивого управления водных ресурсов является интеграция различных точек зрения и интересов. Нужны согласованные действия управления водными, земельными ресурсами, поверхностными и подземными водами...», только комплексный подход позволит решить проблему водообеспеченности ЗПИ.

Изучение гидрологического режима ЗПИ идёт разрозненно разными ведомствами с разными целями и задачами. В результате, в настоящее время мы имеем разрозненную информацию. В этих исследованиях район Ильменей не представлен как единый гидро-графический комплекс. Поэтому необходимо создать стандартную и оптимальную форму их проведения. Не менее важны единые способы и формы обработки данных.

Традиционные методы мониторинга водных объектов на Нижней Волге базируются на точечных наземных сетевых измерениях глубины и объёмов водных потоков, которые затем интерполируются при переходе к пространственной модели. Из-за разрушения единой наблюдательной гидрометеорологической сети стало практически невозможно дать объективную оценку гидрологического режима различных участков Нижней Волги.

Для обследования больших территорий возможно использование аэровизуальное наблюдения или аэрофотосъёмки. Но при выполнении аэровизуальных обследований необходимо наличие большого количества наземных ориентиров и хорошие топографические карты.

Аэрофотосъёмка более информативна при наличии нескольких последовательных фотосъёмок. Но хорошие снимки получаются в случае, если разлив воды представлен ровной водной поверхностью.

Заросшие водоёмы затрудняют, ограничивают применение аэрофотосъёмки на большом протяжении ильменей.

На современную высоту уровня воды в Волге и заливаемости ВАП, нерестилища и ЗПИ влияет интенсивный размыв русла в нижнем бьефе Волгоградской ГЭС. В своей работе Г.А. Мажбиц и Е.П. Буланова отмечают что, понижение базиса эрозии русла реки от нижнего бьефа Волгоградской ГЭС до Енотаевки, связанное с общим размывом русла превысило проектные отметки и составляет 1,5–1,7 м при меженных расходах 0,5–0,6 в половодье. В результате для поддержания гарантированных глубин и водообеспечения ВАП нужны повышенные расходы воды с ГЭС до 6 тыс. м<sup>3</sup>/с. против 4 тыс. м<sup>3</sup>/с. Суточные и недельные перепады воды в нижнем бьефе (особенно в воскресные дни) дестабилизируют водный режим (Мажбиц).

Такую же закономерность отмечают И.В. Землянов и О.В. Горелиц (ГОИН) «в зоне ЗПИ и ВАП наблюдается тенденция постепенного врезания (понижение абсолютных отметок дна) русла магистрального рук. Бахтемир и Волги. Одновременно с врезанием русла магистрального водотока происходит заиление и отшнуровывание истоков водотоков, обеспечивающих поступление воды в водоёмы».

Снижение абсолютных отметок дна русла магистрального водотока и фактическое повышение отметок дна истоков, питающих ильми, приводит к тому, что с каждым годом при половодье одного и того же объёма воды абсолютные отметки уровня воды в магистральном водотоке снижаются. С течением времени для поступления равных объёмов воды на ЗПИ необходимо обеспечить более высокие уровни воды в нижнем бьефе, а это потребует увеличения максимальных сбросов воды в нижний бьеф с Волгоградского водохранилища.

Зафиксировать и оценить эти процессы на различных стадиях полевыми исследованиями возможно только при комплексном постоянном мониторинге. Это практически невозможно, учитывая размеры площадей ЗПИ. Поэтому в наши дни на первое место выходит использование космических снимков – дистанционное зондирование земли (ДЗЗ). Научная и методическая результативность использования материалов ДЗЗ с наземными наблюдениями не вызывает сомнений.

Кроме того, космические снимки можно и нужно использовать комплексно, корпоративно разными ведомствами. В результате это будет выгодно для многих субъектов и органов государственного управления, которые будут иметь комплексную картину происходящих природных процессов и смогут оперативно принимать нужные решения. Поэтому своевременная доставка нужной информации представляет большой экономический эффект как прямой, так и косвенный.

В последнее время для разработки технологий управления водными ресурсами стали использоваться водно-балансовые модели, что позволяет более эффективно использовать ограниченные водные ресурсы.

Анализ гидрографов весеннего попуска объёмов воды, уровней и особенностей распределения стока по основным водотокам показал, что в настоящее время в силу различных причин график «оптимального» сброса достаточного объёма воды в ильмени может корректироваться в ограниченных пределах, что затрудняет своевременное принятие решений о параметрах распределения воды по системам ЗПИ. Сотрудниками ГОИНа, ИВП АН РАН, Астраханского ЦГМС была разработана новая водно-балансовая модель района ЗПИ, позволяющая рассчитывать с суточной дискретностью приток, изменения объёма воды, видимое испарение и отток в каждом из выделенных районов дельты с учётом водообмена между ними. Результаты расчёта составляющих водного баланса различных районов дельты при различных сценариях гидрологического режима, водохозяйственных и гидротехнических мероприятий могут лежать в основу выработки научных рекомендаций по оптимизации экологического состояния, хозяйственного использования и управления водными ресурсами устьевой области Волги.

Таким образом, для изучения взаимодействия общества и среды обитания необходимо проводить комплексный космовизуальный мониторинг территории как единственно возможный в реальном времени, достоверный метод комплексного и точного анализа состояния окружающей среды, т.е. формирования геоинформационного поля Астраханской области и прилегающей территории, а для принятия решения по управлению водными ресурсами использовать водно-балансовые модели.

## **ЗПИ – зона хронического экологического бедствия астраханской области**

Историческая справка. Первые гидрологические, а точнее гидрографические, исследования западных водоёмов носили описательный характер. Одним из первых исследования водоёмов выполнил академик С.Г. Гмелин в конце 1770-х начале 1780-х гг. Результатами исследований явились сведения о величине ильменей и озёр; освещены вопросы происхождения соленых озёр; составлены две карты озёр, а также дана классификация озёр по степени солёности. В последующие периоды структура исследований особых изменений не претерпела. Из дореволюционных исследований наибольший интерес представляют исследования В.И. Мейснера, который, помимо составления карты дельты Волги (в том числе и западных водоёмов), привёл описание многих ильменей и озёр и предложил принцип классификации ильменей по их генетическим признакам. Наиболее важным гидрологическим фактором, оказывающим решающее воздействие на гидрологический режим западных водоёмов, является сток воды. Первые измерения расходов воды на водотоках (питающих западные водоёмы) были произведены в период исследования Бахтемира и Волго-Каспийского канала с целью улучшения судоходных условий. В 1923–25 гг. были разбиты гидрометрические створы на водотоках Дарма, Ножевский, Бертьоль, Алгаза, Хурдун, проток в ильм. Верхний, Бушма, в горле ильм. Бесчастный, Подстепок (в истоке и устье) и измерено по 2–4 расхода воды. Полученные данные наблюдений, несмотря на их приближенность, позволили впервые рассчитать водный баланс западных водоемов. Для обоснования рыбохозяйственных мероприятий в 1937–40 гг. Волго-Каспийской рыболовецкой станцией и Гидрорыбпроектом были измерены расходы воды на водотоках, отделяющихся от Волги и Бахтемира, а также на ряде водотоков, протекающих на территории западных ильменей и соединяющих ильменные котловины. Данные об измеренных расходах воды приведены в научной и справочной литературе.

В 1950–52 гг. Астраханский филиал Гипроводхоза измерил расходы протока Хурдун и ряда других протоков в районе западных ильменей. К сожалению, данные этих измерений не обнаружены.

В 1953–54 гг. Волжской устьевой станцией проведены рекогносцировочные обследования западных ильменей и питающих их водотоков. Результаты исследований опубликованы. В 1954 г. эта организация приступила к работам по изучению распределения стока воды в дельте Волги. На отходящих от Бахтемира водотоках было разбито 13 гидрометрических створов, на которых измерялись расходы воды; при этом впервые были измерены расходы воды на мелких водотоках, действующих только в период половодья.

В 1961 г. большие работы по определению приточности воды в западные ильмени провел Волгоградский филиал института «Гидропроект». Исследования проводились на 8 водотоках, причём были измерены расходы воды на водотоках, отходящих от русла Волги. На каждом гидрометрическом створе измерено от 5 до 14 расходов воды. В этом же году измерялись расходы воды на пр. Таранхол. В 1962 г. силами Астраханской ГМО были измерены расходы воды на пр. Подстепок.

В 1976 г. «Каспморниипроект» исследовал сток воды протока Подстепок. По разности расходов воды в истоке и устье стало возможным определить величину отточного стока из западных ильменей; в 1991 г. аналогичные работы выполнил Астраханский ЦГМС.

В 1980–91 гг. Астраханский ЦГМС продолжил исследования распределения стока воды в системе рукава Бахтемир. На семи водотоках, отходящих от Бахтемира в западные ильмени, было измерено 53 расхода воды.

В 1983 г. Астраханское отделение «Гидрорыбпроекта» исследовало сток воды протоков Хурдун и Алгаза в среднем их течении. На трёх гидростворах было измерено 15 расходов воды.

В 1990–92 гг. Астраханский трест инженерно-технических изысканий открыл гидрометрические створы на водотоках Чилимная, Ножевский, Бертуль, Прямой Бертуль, Кривой Бертуль, Алгаза, Хурдун, Икрянка, Верхний, Бирючий, Бушма, Данилин, Копьев, Таранхол, Гаванный, Три ерика, Арбузный. На каждом гидростворе было измерено от 3 до 6 расходов воды. Всего измерено 69 расходов воды.

В течение многих лет исследования стока воды водных трактов проводило управление «Астраханмелиоводхоз». Однако в последние годы учёт стока воды в оросительных системах инструменталь-

ным способом не ведётся, а осуществляется по энергозатратам и производительности насосных станций. В вопросе деформации русел водотоков, питающих западные ильмени, а также заносимости ильменных котовин важное значение имеют сведения о стоке взвешенных наносов. Анализ научной литературы и справочных пособий показал, что данному вопросу должного внимания не уделялось. Расходы взвешенных наносов измерялись в 1954 г. на пр. Хурдунус с. Икряное (12 расходов) и в 1989 г. на семи водотоках, отходящих от рук. Бахтемир (по 3–4 расхода), что крайне мало для оценки стока взвешенных наносов, поступающих в ЗПИ.

Таким образом, работы по определению стока воды, поступающего в ильмени и вытекающего из них, начались достаточно давно; до 2003 г. измерено около 1400 расходов воды, из них 75% приходится на долю гидрометслужбы. Однако их использование затруднительно по причине разновременности наблюдений, различного качества и недостаточного количества измеренных расходов воды на фазах подъёма и спада половодья. Вместе с тем, полученные данные наблюдений позволяют проследить в многолетнем разрезе тенденцию изменчивости стока воды отдельных водотоков. Сведения об измеренных расходах воды и взвешенных наносов в 1937–80 гг. опубликованы в научной и справочной литературе. В связи с прекращением после 1980 г. ежегодных измерений расходов воды в истоке рукава Бахтемир, являющегося главным источником питания западных ильменей, дальнейшие исследования стока воды производились периодически. В отдельные годы выполнялись работы по измерению расходов воды на других водотоках, питающих западные ильмени [1].

Современные исследования ЗПИ. 29 февраля 2000 г. глава Администрации Астраханской области издаёт постановление «О комплексной программе повышения водообеспеченности зоны западных подстепных ильменей на 2000–2010 годы». В целях выполнения этого постановления Астраханский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета выполнил значительный объём работ по определению величины приточно-отточного стока воды и взвешенных наносов в западных подстепных ильменях. На водотоках, служащих в качестве водоподводящих и водоотводящих объектов, были открыты гидрометрические створы, на которых

измерены расходы воды и взвешенных наносов с учётом полного размаха колебаний уровня воды, как на подъёме половодья, так и на спаде. Кроме того, дополнительно были измерены расходы воды на других протоках [2].

Сведения о гидрометрических створах и количестве измеренных расходов воды и взвешенных наносов приведены в табл. 2.

Полученные результаты исследований стока воды и взвешенных наносов дали возможность определить схему поступления и отточности воды и наносов в исследуемом районе, рассчитать водный баланс и баланс стока наносов, их пространственное распределение, а также показать тенденцию изменчивости стока воды и наносов под воздействием различных факторов как отдельных водотоков, так и общей величины стока воды, поступающего в ильмени и вытекающего из них. Следует указать, что проведённые исследования стока воды и взвешенных наносов в 2003–07 гг. как по объёму, так и по масштабу охваченной наблюдениями территории западных ильменей, заметно выделяются на фоне исследований, выполненных в прежние годы силами различных организаций. В 2008 г. Астраханский ЦГМС выполнил работы по изучению отдельных элементов ледового режима ильменей и озёр экспедиционным путём. Так, 27 января 2008 г. проведены визуальные наблюдения за замерзаемостью солёных озёр, расположенных вдоль автодороги Линейное-Хулхута. Несмотря на достаточную сумму градусо-морозов ( $-362^{\circ}\text{C}$  по данным МС Астрахань), большинство солёных озёр (Солёное у с. Линейное, Мусалин-Хак, Мазна-Хак и др.) не имело ледяного покрова. 14 февраля 2008 г. были выполнены визуальные наблюдения над условиями замерзания солёных озёр вдоль автодороги Буруны-Михайловка и инструментальные измерения толщины льда на протоках Дарма, Садовка, Три ерика, Верхний, Хурдун, Бертуль и ильменях Горчичный, Шушай, Япрак, Чичин, Малиновский, Фарпус, Раздолье, Передний Хатын, Газын, Чанта, а также на Лиманском канале. В период измерения толщины льда на шести водных объектах произведён отбор проб воды с целью определения солевого состава воды и его воздействия на условия замерзания ильменей и озёр. Параллельно с наблюдениями на стационарных временных гидрологических постах Астраханского ЦГМС выполнил в 2005–07 гг. экспедиционные наблюдения над уровнем воды путём нивелирования горизонтов

Таблица 2

## Гидрометрические створы Астраханского ЦГМС

№ п/п	Водоток	Географиче- ские координа- ты		Количество измеренных расходов									
				2003 г.		2004 г.		2005 г.		2006 г.		2007 г.	
		с.ш.	в.д.	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
1	Бахтемир	46°13'	47°54'	6	6	—	—	—	—	—	—	—	—
2	Каньга	46°18'	47°59'	—	—	8	6	1	—	5	1	7	5
3	Малая Дарма	46°18'	47°57'	7	5	8	6	—	—	—	—	—	—
4	Дарма	46°17'	47°55'	10	8	8	7	12	10	5	2	6	5
5	Ножевский	46°14'	47°54'	11	9	12	10	15	11	9	7	10	8
6	Без названия у с. Кр. Бар- рикады	46°13'	47°52'	8	6	9	7	8	4	2	—	8	5
7	Бертуль	46°12'	47°52'	12	10	13	9	15	11	8	7	10	8
8	Алгаза	46°11'	47°50'	9	7	8	5	11	10	6	2	7	5
9	Без названия у с.Бахтемир	46°10'	47°49'	9	7	9	8	8	6	6	4	8	7
10	Порещин	46°08'	47°47'	3	2	7	5	4	2	—	—	6	4
11	Хурдун	46°06'	47°44'	8	7	11	10	13	10	8	7	8	8
12	Икрянка	46°06'	47°44'	8	6	9	8	11	9	8	4	8	7
13	Верхний	45°58'	47°38'	11	10	11	10	14	11	7	6	10	8
14	Бирючий	45°57'	47°38'	11	10	11	10	16	10	8	7	10	8
15	Бушма	45°57'	47°37'	11	10	11	10	15	11	8	6	10	8
16	Данилин	45°56'	47°37'	11	10	11	10	16	9	8	6	10	8
17	Копьев	45°56'	47°37'	11	9	10	9	16	8	8	6	10	8
18	Без названия	45°55'	47°37'	9	6	9	8	11	9	6	5	10	8
19	Таранхол	45°55'	47°37'	11	10	12	10	18	11	8	7	10	8
20	Три ерика	45°52'	47°36'	8	7	10	10	13	11	5	5	8	8
21	Арбузный	45°52'	47°35'	—	—	6	—	13	10	7	4	9	8
22	Хурдун	46°05'	47°39'	7	7	10	10	—	—	—	—	—	—
23	Без названия	46°05'	47°39'	4	—	2	—	—	—	—	—	—	—
24	Соленая дорога	46°06'	47°39'	—	—	5	—	—	—	—	—	—	—
25	Киссин	46°03'	47°39'	—	—	6	—	—	—	—	—	—	—
26	Хаптха	46°13'	47°15'	—	—	—	—	—	—	4	—	3	—
27	Бува	46°15'	47°39'	—	—	—	—	5	—	—	—	1	—
28	Форпус	46°07'	47°08'	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—
		<b>Всего:</b>		<b>185</b>	<b>152</b>	<b>216</b>	<b>168</b>	<b>235</b>	<b>163</b>	<b>126</b>	<b>86</b>	<b>171</b>	<b>134</b>

Примечание: а – количество измеренных расходов воды; б – количество измеренных расходов взвешенных наносов

воды протоков, ильменей и озёр. В каждом пункте выполнено по 3–26 нивелировок горизонтов воды; на большинстве пунктов измерения проведены на фазе подъёма, пика и спада половодья. В пунктах №№1–6, 8–11, 13–25, 28, 30, 35, 41, 44, 45, 47, 48 измерения выполнены в Балтийской системе высот. Следует указать, что в пунктах №№25–37 нивелирование горизонтов воды выполнялись в 2003–2007 гг. при производстве измерений расходов воды (по 20–26 измерений). На каждом водном объекте в течение апреля–июля было произведено по 4–14 измерений температуры воды. Учитывая, что наблюдения над температурой воды в период экспедиций производились в различное время суток, для получения надёжных зависимостей между температурой воды опорного пункта и временными пунктами были организованы 8 срочные наблюдения над температурой воды (при помощи автоматического гидрологического комплекса ГМУ-2) на опорном пункте наблюдений в г. Астрахани на Золотом Затоне. Полученные результаты экспедиционных наблюдений существенно дополнили массивы данных наблюдений над температурой воды на стационарных пунктах, что позволило более детально осветить пространственное распределение температуры воды по территории западных ильменей.

Следует обратить внимание на равномерность расположения пунктов наблюдений по территории западных ильменей (табл. 3).

Разработка модели водообмена. В 2008 г. по заданию Администрации Астраханской области была выполнена научно-исследовательская работа по теме «Создание модели устойчивого водообеспечения зоны Западных подстепных ильменей Астраханской области». Цель работы – исследовать современное состояние зоны ЗПИ и разработать модель водообмена главного магистрального водотока дельты Волги с ЗПИ, позволяющую выполнять его ежедневный и по фазам половодья расчёт как в ходе половодья, так и с некоторой заблаговременностью при наличии прогноза хода уровня воды на посту Астрахань. Такие расчёты должны лежать в основу выработки решений по принятию мер, способствующих устойчивому водообеспечению зоны ЗПИ Астраханской области. Характеристика современного состояния зоны ЗПИ выполнена путём определения её общей площади, площади водных объектов в межень и на пике половодья, площадей сельскохозяйственных угодий с привязкой к

водным объектам, учёта водных объектов, эксплуатируемых под рыборазведение, выявления и картирования искусственных сооружений, регулирующих подачу воды в ЗПИ, с оценкой их влияния на проточность ЗПИ в период половодья. Закономерности процессов заполнения в половодье и последующей сработки ЗПИ до последнего времени не изучались.

Оценка изменений уровня воды ЗПИ и водообмена главного магистрального рукава дельты Волги с ЗПИ при половодьях различного типа выполнена по данным уникальных наблюдений за уровнями воды в 13 пунктах ЗПИ (2004–08 гг.) и измерений расходов воды в 20 водотоках, связывающих ильмени с главным дельтовым рукавом. Эти работы выполнялись совместно сотрудниками ГОИН и Астраханским центром гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды в рамках экспедиционных грантов РГФИ. Использованы также результаты НИОКР Росгидромета и других проектов. На этих данных была обоснована и разработана модель водообмена главного магистрального водотока дельты Волги–Бахтемира с ЗПИ для создания гидрологических основ водообеспечения западных подстепных ильменей в дельте Волги при различных гидрографах половодья [2].

Для параметризации и калибровки модели водообмена главного магистрального водотока дельты Волги с ЗПИ использованы данные измерений расходов воды за 2003–08 гг. в водотоках, связывающих ильмени с главным дельтовым рукавом. В матрице модели использованы впервые построенные и аппроксимированные аналитическими функциями неоднозначные для разных фаз половодья зависимости этих расходов от уровней воды по посту Астрахань. По ним рассчитаны гидрографы расходов воды для половодий разных типов. Водообмен с ЗПИ как за каждый день, так и интегрированный для разных фаз половодья на разных участках по длине главного дельтового водотока, оценён по этим гидрографам алгебраическим суммированием притоков к ильменям и оттоков из них.

В рамках выполненной темы впервые разработана концепция модели устойчивого водообеспечения зоны ЗПИ. Сделан вывод о том, что ее основу должна составлять водно-балансовая модель ЗПИ, учитывающая водообмен главного магистрального рукава дельты Волги с ЗПИ, изменения площади водного зеркала и объ-

Таблица 3

**Пункты экспедиционных наблюдений над уровнем воды  
в западных ильменях в 2005–07 гг.**

№ п/п	Водный объект	Наименование объекта	Координаты пункта		Количество измерений
			с.ш.	в.д.	
1	проток	Каньга	46°20'	47°51'	11
2	ильмень	Без названия	46°19'	47°52'	8
3	проток	Дарма	46°16'	47°49'	26
4	ильмень	Балды Кашкан	46°16'	47°44'	11
5	ильмень	Сайкуль	46°16'	47°44'	11
6	ильмень	Балды Кашкан	46°16'	47°38'	12
7	ильмень	Горчичный	46°18'	47°38'	14
8	ильмень	Садовый	46°19'	47°41'	13
9	ильмень	Шушай	46°13'	47°32'	17
10	ильмень	Парпост	46°15'	47°30'	20
11	ильмень	Табу Хурдун	46°12'	47°30'	16
12	ильмень	Уласты	46°11'	47°30'	10
13	ильмень	Семеновский	46°13'	47°47'	8
14	ильмень	Соленая дорога	46°05'	47°40'	13
15	ильмень	Алтата	46°06'	47°20'	5
16	ильмень	Кошата	46°04'	47°14'	8
17	ильмень	Дундук	46°04'	47°21'	10
18	ильмень	Грязный	46°03'	47°30'	13
19	ильмень	Большой Чапчалган	45°59'	47°22'	8
20	ильмень	Газын	45°54'	47°18'	18
21	проток	Хатавинский	45°52'	47°20'	19
22	ильмень	Сурхата	45°49'	47°10'	14
25	проток	Дарма	46°17'	47°55'	20
26	проток	Ножевский	46°14'	47°54'	26
27	проток	Бертьоль	46°12'	47°52'	26
28	проток	Алгаза	46°11'	47°50'	22
29	проток	Икрянка	46°06'	47°14'	23
30	проток	Верхний	45°58'	47°38'	25
31	проток	Бирючий	45°57'	47°38'	26
32	проток	Бушма	45°57'	47°37'	26
33	проток	Данилин	45°56'	47°37'	26
34	проток	Копьев	45°56'	47°37'	26
35	проток	Таранхол	45°55'	47°37'	26
36	проток	Три ерика	45°52'	47°36'	23
37	проток	Арбузный	45°52'	47°35'	23

*Продолжение таблицы 3*

№ п/п	Водный объект	Наименование объекта	Координаты пункта		Количество измерений
			с.ш.	в.д.	
38	ильмень	Япрак	46°15'	47°23'	7
39	ильмень	Бугульчин	46°16'	47°21'	5
40	озеро	Соленое	46°16'	47°22'	6
41	ильмень	Хаптха	46°13'	47°15'	8
42	ильмень	Б.Шикерта	46°10'	47°16'	4
43	озеро	Без названия	46°05'	47°08'	3
44	проток	Кукшин	45°08'	47°11'	10
45	проток	Сахта	45°49'	47°20'	6
46	проток	Каньга	46°20'	47°54'	4
47	проток	Дарма	46°17'	47°52'	11
48	ильмень	Передний Хатын	45°59'	47°10'	5
49	ильмень	Фарпус	46°07'	47°08'	5
50	озеро	Малиновское	46°08'	47°09'	4

емов воды водных объектов при прохождении половодья, а также потери воды на испарение. При этом должна быть оценена роль гидротехнических сооружений и мероприятий по искусственному регулированию пропуска половодья в ЗПИ. Модель устойчивого водообеспечения ЗПИ должна осуществлять функции мониторинга и прогноза пропуска половодья в ЗПИ, воспроизведения сценариев для принятия решений по оптимизации искусственных мер по пропуску половодья. Учитывая большой объём задач, перечисленных в концепции модели устойчивого водообеспечения зоны ЗПИ разработку этой модели следует продолжить в последующие годы.

**Рекомендации астраханской группы ИВП РАН  
по решению проблемы устойчивого  
водообеспечения ЗПИ**

На данном этапе разработана модель водообмена главного магистрального водотока дельты Волги с ЗПИ. Она является основополагающей частью общей модели устойчивого водообеспечения зоны ЗПИ.

Для завершения создания модели устойчивого водообеспечения зоны ЗПИ в последующем требуется выполнить следующие этапы работ в ориентировочной последовательности:

- Создание водно-балансовой модели ЗПИ в целом.

- Выделение отдельных районов для дифференцированной оценки их водного баланса с учётом подводящих к ним (от них) воду водотоков, гидрографических особенностей ЗПИ и водохозяйственных комплексов в них.
- Выявление путей водообмена между выделенными районами с учётом естественной гидрографии и антропогенных мероприятий.
- Создание дифференцированной по районам водно-балансовой модели ЗПИ.
- Разработка модели устойчивого водообеспечения ЗПИ с функциями мониторинга и прогноза пропуска половодья в ЗПИ, воспроизведения сценариев для принятия решений по оптимизации искусственных мер по пропуску половодья.

В итоге будет получена модель для расчёта изменений уровня, площади зеркала воды и составляющих водного баланса ЗПИ, таких как приток (отток) в (из) ЗПИ, изменения объёма наполнения ЗПИ, потери воды на видимое испарение. В процессе увязки водного баланса ЗПИ за определенные промежутки времени, с учётом водохозяйственной деятельности и работы гидротехнических сооружений в них, будут уточняться параметры модели.

Водно-балансовая модель ЗПИ может быть использована для разработки оптимальных сценариев наполнения водой их различных районов (по различным водным трактам). При этом необходимо по прогнозному гидрографу попусков из Волгоградского водохранилища спрогнозировать гидрограф стока в по г/с Верхнее Лебяжье и гидрографы хода уровня воды по г/п Астрахань и (или) г/п Икряное. По этим гидрографам разрабатываются сценарии естественной и искусственной подачи воды в различные районы ЗПИ, из них выбирается оптимальный вариант.

Сформулированный подход к решению проблемы устойчивого обеспечения водой ЗПИ нуждается в значительном уточнении в следующих отношениях:

- Требуется изучить современные проблемы водохозяйственного использования ЗПИ и перспективы его развития.
- Требуется получить уточнённые данные о водных трактах, водозаборах, насосных станциях, шлюзах и дамбах в ЗПИ и режиме их работы и выполнить анализ их целевого назначения, технических возможностей и реального режима работы.

- Требуется построение связей площади зеркала ЗПИ для их различных районов (связанных с различными водными трактами) с уровнями воды в них. Для этого необходимо привлечение имеющихся данных наблюдений за уровнями воды в ЗПИ и данных их космических съёмок и получение новых данных.
- Требуется по новым и уточнённым данным проанализировать динамику водообмена ЗПИ с Волгой и рук. Бахтемиром через соединяющие их водотоки с выявлением роли его искусственного регулирования.
- Необходимо также продолжить полевые работы по рекогносцировочному обследованию гидрографической сети ЗПИ, получению данных для дешифровки их космических изображений, измерению расходов воды в водотоках, соединяющих ЗПИ с главным магистральным рукавом дельты Волги, по измерению уровней воды в различных водных объектах ЗПИ при прохождении половодья и после него. В том числе целесообразно организовать круглогодичные наблюдения за уровнями воды у гидротехнических сооружений и на других объектах в ЗПИ, где постоянно или эпизодически присутствуют работники водохозяйственных служб и местных административных органов.

### **Экологические проблемы**

Рабочая группа по оценке экологического и технического состояния водотоков Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги, включая ЗПИ, изучила сложившуюся ситуацию в дельте Волги и ЗПИ, а также научные материалы и заключения, представленные Институтом водных проблем РАН, и КаспНИИРХ, учитывая реалии сегодняшнего дня, связанные с импортозамещением и обеспечением потребителей отечественной рыбной и сельхозяйственной продукцией, пришла к выводу, что решение проблем – обводнение территории ЗПИ; воспроизводство рыбных запасов; развитие сельского хозяйства (орошение, заготовка грубых кормов) – возможно только в комплексе, где приоритет отдается воспроизводству рыбных запасов, то есть увеличению нерестовых площадей и, как наиболее оптимальному и наименее затратному варианту, восстановлению природных нерестилищ ЗПИ.

Маловодный период в низовьях Волги, начавшийся в середине прошлого десятилетия, продолжается, по крайней мере, до 2017 г.

Так, составленный ещё в 2006 г. долгосрочный климатический прогноз, к сожалению, оправдывается ежегодно уже на протяжении 9 лет (об этом ежегодно докладывается на региональном, межрегиональном, всероссийском и международном уровнях) [3]. Поэтому, считаем, что ориентироваться нужно не на оптимистичный прогноз гидрометцентра ( $128\text{--}161 \text{ км}^3$ ), а на более реальный прогноз центра регистра и кадастра –  $72,7 \text{ км}^3$ . Этому способствует и малый снегозапас в бассейне Волги, и затяжная, холодная весна. Следует отметить (по многолетнему опыту), что все последующие уточнения Гидрометцентра и других служб, как правило, имеют тенденцию к снижению ожидаемых объёмов и уровней.

Запланированные работы по разваловке завалок и дамб – дело, конечно, хорошее, однако, всё равно, большая часть стока Бахтемира проходит транзитом в море потому, что основной сток в ЗПИ в естественных условиях происходил не по водным трактам, а плоскостным стоком (и даже при малой глубине этих проранов, их ширина составляла сотни и тысячи метров, что и обеспечивало большую приточность, при малой скорости потока, что очень важно). Сейчас плоскостной сток практически отсутствует из-за дорог и насыпей, тянувшихся вдоль русла Бахтемира. По заключению КаспНИИРХа уже сегодня количество отмелиорированных нерестилищ восточной части дельты и Волго-Ахтубинской поймы для воспроизводства рыбы частиковых пород недостаточно из-за их неполной заливаемости, резких температурных колебаний и других негативных факторов сложившихся в последние два десятилетия, в то же время десятки тысяч гектаров естественных нерестилищ в ЗПИ, менее подверженных температурным колебаниям, и не требующих для заполнения максимальных объёмов сброса воды с ГЭС, практически не работают.

В настоящее время нет единой стратегии восстановления ЗПИ, частично их используют как водохранилища, водные тракты, в отдельных местах по ложам ильменей строят каналы для орошения, используют под товарное рыбоводство, а часть ильменей переведено в земли сельхозназначения, те же ильмины, что открывают для пропуска воды в период половодья, в большинстве своём не способны пропустить достаточное количество воды и рыбы к нерестилищам, поскольку дамбы убираются не полностью, а русла ериков и

проток, и частью и сами ильмени заросли тростниками крепями, начинается массовое заболачивание ильменей и зарастание их болотной растительностью, в большей части тростником и рогозом. Работы, проводимые правительством Астраханской области и администрациями районов, ввиду недостаточного финансирования заключаются в частичном вскрытии дамб и дноуглубительных работах, как правило, без расчётов и научного обоснования, что может привести к непредсказуемым последствиям.

При наличии желания, доброй воли и оперативности, местные органы власти могли бы очень эффективно использовать последствия природного явления, характерного для нижней дельты и южной части ЗПИ – это штормовые нагоны. Издавна местные жители прибрежных районов ожидали весенних нагонов, так как благодаря им побережье затапливалось практически пресной северо-каспийской водой, осуществлялся процесс «естественного обводнения» территории, заполнялись и промывались ильмени. К сожалению, сейчас этим никто не занимается, хотя воду требуют все!

Есть такое природное явление на северо-западном Каспии и в южной части ЗПИ, суть его в том, что когда начинает дуть сильный юго-восточный ветер, местное название «моряна» – вода с моря, пригнанная ветром, начинает подпирать воду в дельте, и ветер начинает гнать воду в ильмени, расположенные в северо-западной части Каспийского моря, от Лагани, до Икряного [4]. Нагоны – нечастое явление, но они были, есть и будут, в той или иной мере каждую весну и если раньше при нагонах вода беспрепятственно уходила в ильмени, и даже далеко в степь, как было при стихийном ветре в 1953 году, когда вода ушла западнее Лагани на 40 км и размыла железную дорогу Астрахань–Гудурмес, при этом саму Лагань не топило, то сегодня на пути воды, венец природы – человек понавалил немеренное количество дамб, в том числе и как бы защитных, как вдоль Лаганского побережья и теперь та вода, что беспрепятственно проходила мимо, ныне упирается в дамбу и грозит потопить город, как это происходит сегодня. Но речь не о Лаганских проблемах, нагоны были дополнительными циклами промывки и пополнения ильменей между паводками, а в этом году нагон при прогнозируемом низком паводке мог бы подпитать ильмени до прихода паводка, но на пути природы «умные» сооружения человека. Вот дамба постро-

енная в 1958 г. при строительстве дороги Астрахань–Лиман, перекрывшая почти 200 метровую ширину протоки Садовка, в то время рыбы было с избытком и о ильменях никто не думал, мосты не строили, строителей не остановило даже то, что на месте дамбы находилась тоня, с говорящим названием «Золотая».

Пока не было этой и следующих дамб вода в паводок и при нагонах доходила до крайних ильменей в течение трёх суток, сегодня загаженные дамбами и заросшие высокой жёсткой растительностью ерика и протоки уже не способны пропускать необходимый объём воды, а где способны, там на пути воды стоят чиновники, как у нас в Лиманском районе, на словах, они не враги природе, а на деле, чтобы отвоевать у них проточный ильмень, уходят годы.

А вот уже набившая всем оскомину ильмень Малая Чада. Сколько лет идёт битва за пропуск воды через ильмень, и, кажется, конец близок, но даже проиграв все суды, колхоз им. Чкалова, при попустительстве и поддержке районной администрации, делает всё от него возможное, чтобы вода прошла через ильмень в минимальных объёмах, невзирая на требования двух отдельных судебных решений. Мало того, что дамба должна быть убрана по ширине 30 метров и до dna, то есть минимум на метр ниже трубы, по факту ширина убранного куска дамбы ровно 20 метров, так она ещё и выше воды в ерике на 40 см. (рис. 1).

Вот так! ...«После нас хоть потоп» – эти слова маркизы Де Помпадур стали лозунгом нынешних руководителей Лиманского района, как использовать богатство ильменей и какие в них богатства им похоже непонятно. А жаль. В ЗПИ необходимо провести весь комплекс мелиоративных работ, ликвидацию бесхозных дамб и выкос жёсткой растительности, очистку русел ериков и проток от накопившегося ила и корневищ тростника и рогоза, то есть обеспечить максимальный пропуск воды и открыть пути миграции рыбы на нерест. Такие работы в Астраханской области может проводить только ФГБУ «Управление вододелителя и нерестилищ», имеющее в своём арсенале весь комплекс необходимой техники.

Поскольку официальной информацией о гидрометеорологической и экологической обстановке по всему Волжско-Камскому бассейну и по Нижней Волге, в частности, располагает только Гидрометслужба РФ, считаю крайне необходимым и важным в состав



Рис. 1. Нагонная вода прорывается через частично убранную дамбу. Фото В.П. Андросова

Общественного экологического совета включить руководителя, в крайнем случае его представителя, местного органа Гидрометеорологической службы (АЦГМ) и обеспечить его присутствие на всех заседаниях Общественного экологического совета.

В краткосрочной перспективе в качестве пилотного проекта возможно восстановление ильменей и водотоков в Лиманском районе, в том числе и бывших федеральных прудов, фактически осущененных и обвалованных дамбами природных ильменей, и основываясь на наблюдениях за экологическим состоянием восстановленных водоёмов и расчётов экономической целесообразности планировать дальнейшее ведение работ по восстановлению ЗПИ. Однако тогда было подготовлено научное обоснование, и Лиманский районный суд признал законными требования Лиманской прокуратуры к колхозу им. Чкалова по ст. 10 п. 6 Водного кодекса РФ:

**Статья 10. Прекращение права пользования водными объектами.**

**Пункт 6. При прекращении права пользования водным объектом водопользователь обязан:**

- прекратить в установленный срок использование водного объекта;
- обеспечить консервацию или ликвидацию гидротехнических и иных сооружений, расположенных на водных объектах, осущест-

вить природоохранные мероприятия, связанные с прекращением использования водного объекта.

Так что прецедент уже имеется, и с такими нарушениями Водного кодекса РФ можно и нужно бороться! В долгосрочной перспективе восстановление и мелиорация нерестилищ, кроме своей основной задачи воспроизводства рыбных запасов, поможет решить такие важные проблемы, как обводнение ЗПИ, заготовка грубых кормов и увеличение пастбищ для КРС на заливных лугах.

### **Заключение: современные проблемы и задачи ЗПИ**

Разработанные Астраханской группой ИВП РАН рекомендации по решению проблемы устойчивого водообеспечения ЗПИ используются в практической работе сотрудниками Астраханской региональной службы природопользования при проведении работ по мониторингу водохозяйственной обстановки.

Важное место в данной работе занимают мероприятия по обследованию зоны ЗПИ. В результате установлены факты наличия несанкционированных завалок, дамб и перемычек, а также приняты меры по их устранению.

К примеру, на ильмене Беркута Наримановского района и ильмене Кура Лиманского района выявлены земляные дамбы, препятствующие поступлению воды в ильмени далее по трактам. Незаконные завалки водных объектов ликвидированы, доступ воды восстановлен.

На озере Шерстак Лиманского района установлено наличие четырёх несанкционированных завалок, затрудняющих доступ воды из ильменя Большой Гашун в ильмень Задний Хатын и далее в водные объекты в границах населённого пункта с. Караванное Лиманского района Астраханской области. По сведениям районной администрации, данные завалки незаконно возведены пользователем рыбоводного участка. Для принятия мер реагирования и рассмотрения вопроса о привлечении виновных лиц к административной ответственности материалы направлены в Управление Росприроднадзора по Астраханской области и ВКТУ Росрыболовства. Работы по мониторингу зоны ЗПИ и выявлению нарушений природоохранного законодательства продолжаются.

В период с 31 января по 21 апреля 2017 г. Службой природопользования и охраны окружающей среды Астраханской области совместно с представителями Нижне-Волжского бассейнового водного управления и Управления эксплуатации Волгоградского водохранилища, при участии органов местного самоуправления Наримановского, Икрянинского, Лиманского районов были проведены комиссионные обследования 77 акваторий водных объектов зоны ЗПИ и 38 объектов охотхозяйств зоны ЗПИ. В ходе проведения обследований зоны ЗПИ службой в 2017 г. был выявлен ряд нарушений законодательства на водных объектах в зоне ЗПИ.

При использовании ильменя Малый Ницанский были выявлены нарушения, связанные с незаконным изъятием грунта для возведения завалки на ильмене, забором водных ресурсов из данного ильменя без разрешительных документов, осушением водного объекта, а также загрязнением земель мусором и нефтепродуктами. За нарушение правил охраны среды обитания объектов животного мира виновное лицо привлечено Службой к административной ответственности. Материалы для принятия мер в рамках полномочий направлены в управление Росприроднадзора по Астраханской области, управление Росреестра по Астраханской области, Волго-Каспийского территориального управления Росрыболовства с целью рассмотрения вопроса о расторжении договора пользования рыбоводным участком. Управлением Росприроднадзора по Астраханской области возбуждены административные дела, рассчитан ущерб на сумму 594 тыс. рублей. Материалы также направлены в органы прокуратуры для возбуждения уголовного дела.

Выявлены факты возведения несанкционированной завалки на водном объекте ерик Мошка Лиманского района Астраханской области и осушения водного объекта – ильмень Малый Руснур Лиманского района Астраханской области, а также создания земляного вала, полностью преграждающего русловую часть ерик Бешенный, незаконной завалки на ильмене Большой Руснур. Материалы направлены в Управление Росприроднадзора по Астраханской области, в Управление Росреестра по Астраханской области, в Управление Россельхознадзора по Ростовской, Волгоградской и Астраханской областям и Республике Калмыкия. Незаконные завалки водного объекта ликвидированы, доступ воды восстановлен.



Рис. 2. Очередная несанкционированная завалка

Управлением Росприроднадзора по Астраханской области рассматриваются вопросы о возбуждении административных дел (рис. 2).

В целом в результате проведённых работ в зоне ЗПИ было вскрыто 32 завалки: 6 в Наримановском районе, 8 в Икрянинском районе, 18 в Лиманском районе. Осуществлён выкос водной растительности на ильмене Япрык Наримановского района. Через 3 шлюза-регулятора на ериках Дарма, Малая Дарма, Солянка продолжается заполнение водных объектов Дарминской системы: со стороны Дармы и Малой Дармы до ерика Мартышка – водонаполнение 50%, ерик Красная протока – водонаполнение 70–80%, водных объектов Ножовской системы – ерик Ножовский – ерик Бертоль до Прикаспийской оросительно-обводнительной системы – водонаполнение 60%.

Водонаполнение ильменей Бунтур, Таби Хурдун, Малый и Большой Табунный, ильмень речка-Табун, ильмень Юлаль и далее по водным трактам Икрянинского и Наримановского районов – 50–60%, ильменей Большой Карабулак – ильмень Культиюкун и далее по трактам – 80–90 %, ильмени Шауча, Харнур и далее по трактам – 50–60%, ильмени Большая и Малая Чада, ильмень урочище Кобел, ерик Глинкогинский и далее по трактам – 50%.

Заполнение водных объектов зоны западных подстепенных ильменей продолжается, ведется мониторинг ситуации [5].

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Синенко Л.Г., Баринов А.И., Бухарицин П.И. Современная гидрологическая изученность района Западных подстепных ильменей. Материалы научно-практической конференции «ООПТ Нижней Волги как важнейший механизм сохранения биоразнообразия: итоги, проблемы и перспективы». Волгоград, 2010. С. 213–218.
2. Бухарицин П.И., Полонский В.Ф., Остроумова Л.П., Синенко Л.Г. Моделирование водообеспеченности района западных подстепных ильменей в условиях разной водности Волги. Материалы научно-практической конференции «Современное состояние водных ресурсов Нижней Волги и проблемы их управления» (18–19 ноября 2009 г., г. Астрахань). АГУ, КаспНИРХ, АГТУ. Астрахань, 2009. С.39-44.
3. Бухарицин П.И., Андреев А.Н. Ритмы солнечной активности и ожидаемые экстремальные климатические события в Северо-Каспийском регионе на период 2007–2017 гг. Труды Международной научной конференции «Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе» (Москва, 19–20 октября 2006 г.). М., 2006. С. 137–143.
4. Бухарицин П.И., Синенко Л.Г., Кабдулова Р.Р. Штормовые нагоны в устье Волги. Научно-технический журнал АГУ Геология, география, глобальная энергия. №2 (37), 2010. С. 106–109.

# **КАЧЕСТВО ВОД СУШИ И ГИДРОЭКОЛОГИЯ**

## **Экологотоксикологические исследования и моделирование качества водных ресурсов юга России**

*А.М. Никаноров, Т.А. Хоружая, Б.Л. Сухоруков, Е.Н. Бакаева*

В течение многих лет под руководством член-корр. РАН А.М. Никанорова проводятся исследования Гидрохимического (Южного) отдела ИВП РАН на водоёмах и водотоках Ростовской, Волгоградской областей, Краснодарского края и выполняются в сотрудничестве с ФГБУ «Гидрохимический институт» Росгидромета. В число изучаемых водных объектов входят большие и малые реки, а также крупные водохранилища бассейна реки Дон в нижнем течении.

Выполнены теоретические исследования внутриводоёмных процессов, динамики формирования качества вод водных объектов юга России (включая крупные водохранилища); экспедиционные полевые работы, в том числе на судах; экспериментальные исследования на основе натурного моделирования загрязнения водных экосистем на мезокосмах; анализ материалов многолетних наблюдений Росгидромета по физико-химическим и биологическим показателям.

### **Многолетние тенденции изменений состояния цимлянского, пролетарского и веселовского водохранилищ по химико-биологическим и токсикологическим показателям.**

Цимлянское водохранилище является одним из крупных водохранилищ Российской Федерации. Оно создано в 1952 г. в нижнем течении реки Дон. Расположено на территории Волгоградской и Ростовской областей и имеет большую эколого-экономическую значимость: является важнейшим звеном технической водохозяйственной схемы бассейна Дона, используется для управления водными ресурсами и качеством воды в бассейне Нижнего Дона.

Химическое загрязнение водохранилища стабильно держится на уровне 3–4 классов качества вод – «воды загрязнённые–грязные». Анализ многолетних данных по интегральному показателю химического загрязнения – удельному комбинаторному индексу загрязнения вод (УКИЗВ) (используемому в мониторинге Росгидромета для общей оценки загрязненности) позволил проследить простран-

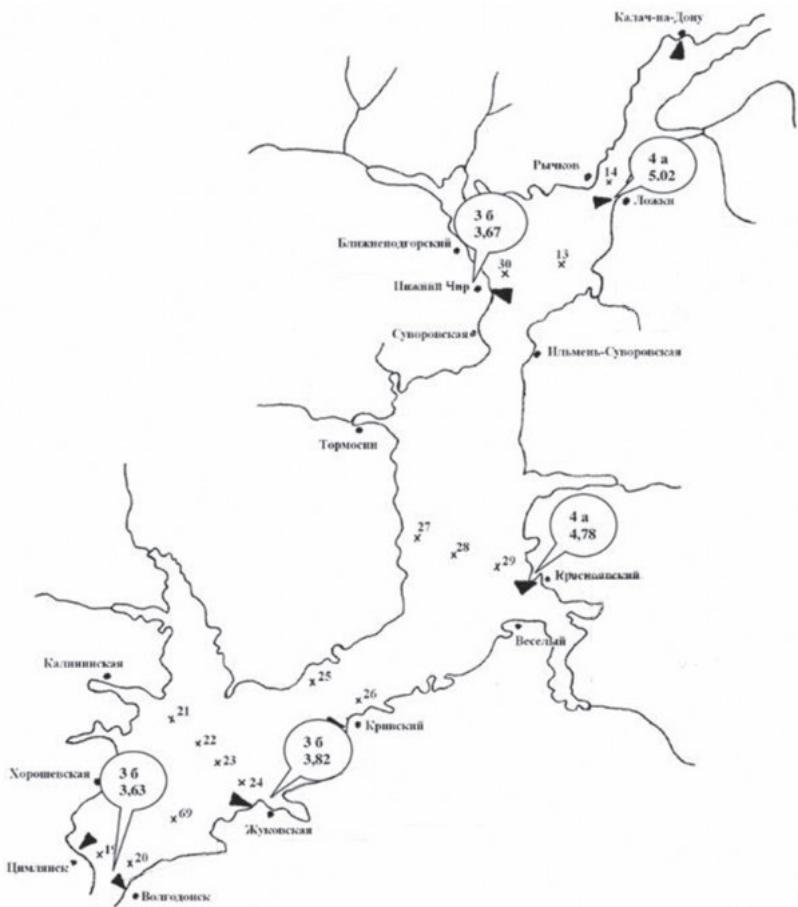


Рис. 1. Характеристика химического загрязнения Цимлянского водохранилища по индексу УКИЗВ

ственные тенденции изменений по численным величинам УКИЗВ и классам качества воды (рис. 1).

Важной проблемой водохранилища, наряду с загрязнением, является цветение воды вследствие интенсивного развития водорослей; оно затрудняет его народно-хозяйственное использование, а иногда даже приводит к чрезвычайным ситуациям в водоснабжении. В этой связи особое внимание в исследованиях было уделено фитопланктону – первому трофическому звену водной экосистемы.



Условные обозначения:

- ▲ пункты наблюдений
- × вертикали
- биомасса синезеленых 0-10 мг/дм<sup>3</sup>
- биомасса синезеленых 10-100 мг/дм<sup>3</sup>
- биомасса синезеленых 100-1000 мг/дм<sup>3</sup>
- для токсичных видов более 50% биомассы синезеленых

Рис. 2. Распределение токсичных видов синезелёных водорослей по акватории Цимлянского водохранилища (по данным режимного мониторинга за 1984–92 гг.)

По результатам наших многолетних исследований Цимлянского водохранилища сделан вывод, что практически ежегодно на водохранилище наблюдается сильное цветение воды вследствие интенсивного развития водорослей. Межгодовые флуктуации в развитии фитопланктона вполне закономерны для Цимлянского водохранилища; сезонность, как и во всех водохранилищах умеренного клима-

та, хорошо выражена. Благоприятную обстановку для развития фитопланктона, определяют особенности гидрометеорологических условий Цимлянского водохранилища и обеспеченность биогенными веществами.

Временные тенденции изменений выражаются в изменении соотношения между систематическими отделами фитопланктона, нарушении смены массовых форм и сезонных планктонных комплексов. В 1970–80-е гг. на протяжении всего вегетационного периода наблюдалась интенсивная вегетация двух доминирующих видов синезелёных: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*. Эти цианобактерии отличаются способностью образовывать токсины, т.е. считаются «токсичными». Позже фитопланктон проб, отобранных в экспедициях ИВП РАН, (2009–12 гг.), характеризовался преобладанием синезелёных именно «токсичных» видов при большем их разнообразии: *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*, *Oscillatoria limnetica*, *Anabaena flos-aquae*. Наибольшая доля их отмечена в центральной части водохранилища (у х. Красноярский и ст. Жуковская), иногда в верхней части (у пгт Нижний Чир) (рис. 2). В отдельные годы здесь они были экстремальными, достигая 896,8 мг/дм<sup>3</sup> и 85 090 тыс. кл/дм<sup>3</sup> соответственно. Доля синезелёных водорослей в общей численности фитопланктона составляла 60–90%.

Токсины синезелёных опасны не только для водной экосистемы, но и для здоровья населения (вода Цимлянского водохранилища используется для питьевого водоснабжения). Следует отметить, что, к сожалению, режимный мониторинг Росгидромета по гидробиологическим показателям, в том числе контроль синезелёных, был ограничен всего несколько годами (1984–92 гг.) и в настоящее время не проводится. Комплексные экспедиции ИВП РАН позволили хоть частично восполнить пробел, что необходимо для оценки современного эколого-токсикологического состояния Цимлянского водохранилища.

Пролетарское и Веселовское водохранилища входят в Манычскую водохозяйственную систему, представляющую собой каскад русловых водохранилищ, построенных в период 1932–36 гг. на реке Западный Маныч в бассейне Дона [5]. По морфометрическим показателям водохранилища значительно уступают Цимлянскому. Создание водохранилищ способствовало решению ряда важных хозяйственных задач обеспечения территории водными ресурсами.

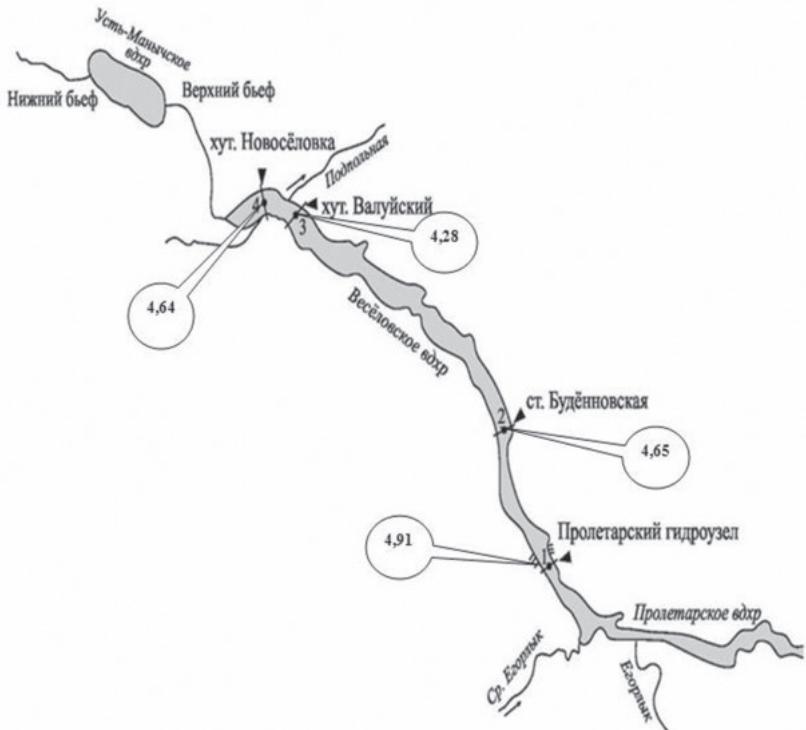


Рис. 3. Характеристика химического загрязнения Усть-Манычских водохранилищ по индексу УКИЗВ

**Химические показатели.** Водохранилища, особенно восточная часть Пролетарского, отличаются повышенным уровнем содержания в воде минеральных солей, что связано с их геологическим происхождением и расположением в зоне солонцеватых почв. Менее минерализована вода Веселовского водохранилища. Наиболее высокие значения минерализации отмечались ниже ст. Буденновской, меньшие – в приплотинной части у хут. Новоселовка [2]. Качество воды Веселовского водохранилища оценивается по комплексу показателей чаще всего как «грязная» (4а класс).

При более детальном рассмотрении загрязнённости по УКИЗВ установлены пространственные изменения по пунктам наблюдений состояния экосистем водохранилищ за многолетний период (рис. 3). Впервые найдены различия в загрязнённости по межгодовой про-

странственной динамике численных величин УКИЗВ (Сочи). Использование численных значений УКИЗВ (максимальным, медианам и средним) позволило установить снижение уровня загрязнённости к створу хут. Валуйский (рис. 3), что соответствует данным о постепенном снижении содержания солей, особенно сульфатов и хлоридов, вниз по течению [2].

**Биологические показатели.** Экологическая ситуация по интегральным биологическим показателям в целом по водохранилищам в последние годы (2014–15 гг.) существенно не изменилась по сравнению с предшествующим периодом наблюдений. Трофность (по фитопланктону) варьировала по пунктам от олиго- до мезотрофной с преобладанием последней. Интенсивность «цветения» (по биомассе водорослей), как и ранее, была незначительной, слабой или умеренной. Значения индекса сапробности (ИС) по фито- и зоопланктону варьировали в пределах II–III классов качества воды (вода «слабо загрязнённая» – «загрязнённая»). Однако отмечены определённые изменения структуры сообщества фитопланктона Веселовского водохранилища. Так, ранее наблюдавшаяся монодоминантность (по численности и биомассе) наблюдалась редко, что указывает на тенденцию улучшения состояния первого трофического звена и, соответственно, всей водной экосистемы. Однако, обращают на себя внимание негативные тенденции: после 2010 г. начал расти вклад синезелёных в сообщество, более того, стали встречаться виды, которые могут быть потенциально «токсичными».

Нельзя не упомянуть о том, что после 2011 г. программы наблюдений Росгидромета претерпели существенное сокращение. Экспедиции, проведённые Гидрохимическим отделом ИВП РАН, позволили в определённой мере восполнить недостаточность гидробиологической информации государственного мониторинга Росгидромета. Сокращение приводит к потере ценной биологической информации, необходимой для анализа экологического состояния водохранилищ сегодня и в будущем. [1].

### **Оценка токсичности вод водохранилищ по данным биотестирования**

Впервые на основе использования стандартных методов биотестирования (на ракообразных, водорослях, рыbach) дана пространственно-временная характеристика токсичности вод Цимлянского,

Пролетарского и Веселовского водохранилищ. Результаты позволяют предполагать возможную роль синезелёных водорослей (они играют ведущую роль в альгоценозах Цимлянского водохранилища), в формировании токсических свойств воды [3]. В то же время вопрос о причинах токсичности Усть-Манычских водохранилищ, которая имеет нерегулярный характер во времени и пространстве, пока не ясен. [4].

Таким образом, на основе результатов экспедиционных работ ЮО ИВП РАН и анализа информации мониторинга Росгидромета выявлен ряд пространственно-временных особенностей эколого-токсикологического состояния крупных водохранилищ бассейна Дона: Цимлянского, Пролетарского и Веселовского. Сравнительной оценке их эколого-токсикологического состояния посвящена публикация [5].

На примере данных по Цимлянскому и Усть-Манычским водохранилищам показано, что приоритетными для использования в мониторинге являются химические показатели, поскольку они являются методами выполнения измерений (МВИ) и внесены в Федеральный реестр МВИ. Биологические индексы весьма разнообразны, но имеют ряд недостатков, связанных в основном с субъективными оценками. Результаты исследований указывают на перспективность использования в научных исследованиях и в мониторинге поверхностных вод, помимо оценки классов качества вод, численных значений величин УКИЗВ, с целью детализации динамики загрязнённости.

Данные по водохранилищам легли в основу рекомендаций по методам оценки токсического влияния фитоценозов планктона на формирование качества ПВС. для наблюдательной сети Росгидромета [6]. Для специалистов в области мониторинга загрязнения и состояния водных объектов и экологов широкого профиля предложены методические подходы с использованием классификаций качества природных вод [7].

Российские технологии экологической оценки состояния поверхностных водных объектов, основанные на биотестировании токсичности, были представлены для обсуждения украинским специалистам [8].

Оценка и нормирование эколого-токсикологического состояния и загрязнения пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей.

Разработаны принципы оценки состояния экологического благополучия и выявления неблагополучия водохранилищ Южного региона России [9]. Наибольший интерес вызывает формулировка и ранжирование критериев относительно удовлетворительного состояния водных объектов на основе показателей, характеризующих ненарушенное или почти ненарушенное естественное состояние водных экосистем с целью их сохранения. Предполагается использовать для этой цели документ, подготовленный совместно с ФГБУ «ГХИ» [10].

Материалы по использованию нормативов химико-биологических показателей для выявления состояний экологического неблагополучия водных объектов на основе ранжирования нарушений действующих нормативов ПДК и измерений биологических характеристик и индексов (на примере многолетней информации государственного мониторинга по Цимлянскому и Манычским водохранилищам.) были рассмотрены и рекомендованы к внедрению в практику мониторинга на Секции рыбохозяйственных нормативов ПДК и ОБУВ НТС ФГБУ «ЦУРЭН» (5 октября 2016 г.).

Результаты анализа экологического благополучия и установления статуса экологического неблагополучия Цимлянского и Усть-Манычских водохранилищ по химическим, токсикологическим (биотестовым) и гидробиологическим показателям опубликованы в статьях, подготовленных совместно с ФГБУ «ГХИ» по материалам режимного мониторинга и экспедиционных исследований ИВП РАН [1,11].

### **Разработка теоретических основ мониторинга внутриводоёмных процессов по дистанционной спектрометрической информации**

Направление, связанное с разработкой теоретических основ изучения внутриводоёмных процессов по данным дистанционных спектрометрических измерений в видимом диапазоне длин волн, вошло в перечень приоритетных со времени создания Южного отдела ИВП РАН с 2000 г. За последние десятилетия эта формулировка (теоретические основы) была уточнена по объективным причинам:

- произошёл качественный скачок в развитии измерительной (в том числе спектрометрической) техники во всём мире;

- при прямой поддержке руководителя работ, А.М. Никанорова, с приобретением портативного спектрометра видимого диапазона S41 фирмы LaserLS (совместно с ГХИ) появилась возможность самостоятельно собирать спектрометрическую информацию на водных объектах Юга России по нескольку раз в различные гидрологические сезоны в течение календарного года;
- появилась возможность проведения натурных экспериментов с формируемыми (искусственно организованными) внутриводоёмными процессами в модельных водных экосистемах – мезокосмах;
- появилась возможность собирать «опорную информацию» – определять концентрации видимых (оптически активных) компонентов (ВК) в параллельно со спектрометрической съёмкой отобранных пробах воды стандартными аналитическими методами.

Таким образом, появилась возможность проверять теоретические выводы о внутриводоёмных процессах, используя оригинальные экспериментально полученные данные дистанционных спектрометрических измерений. Кроме того, качество получаемых спектрометрических данных позволило сравнивать их с данными, публикуемыми в зарубежных периодических изданиях и использовать для разработки фундаментальных основ формирования спектров восходящего от воды излучения. Ниже изложены основные результаты работ по этому направлению.

На основе теории светорассеяния разработана модель расчёта спектров коэффициентов яркости (СКЯ) восходящего от воды излучения. Необходимость создания такой модели очевидна. Она даёт возможность понять механизм формирования сигнала, регистрируемого при пассивном дистанционном зондировании водных объектов (ВО). При фиксированных геометрических условиях съёмки и учёте аддитивности показателей поглощения и рассеяния, выражение для СКЯ следующее:

$$\rho_\lambda(\sigma, \alpha) = \Sigma_\lambda(\sigma, \alpha) / K_\lambda(\sigma, \alpha), \quad (1)$$

$$\Sigma_\lambda(\sigma, \alpha) = \sigma'_{\lambda, MB} C_{MB} + \sigma'_{\lambda, \Phi\Pi} C_{\Phi\Pi} + \sigma_{\text{воды}}, \quad (2)$$

$$K_\lambda(\sigma, \alpha) = [\alpha_{\lambda, MB} + (1 - \Phi_{\lambda, MB})\sigma_{\lambda, MB}]C_{MB} + \\ + [\alpha_{\lambda, \Phi\Pi} + (1 - \Phi_{\lambda, \Phi\Pi})\sigma_{\lambda, \Phi\Pi}]C_{\Phi\Pi} + 0,5\sigma_{\lambda, \text{воды}} + \alpha_{\lambda, \text{воды}} + \alpha_{\lambda, \text{РОВ}}. \quad (3)$$

Здесь  $\alpha_{\lambda,i}$ ,  $\sigma_{\lambda,i}$ ,  $\alpha'_{\lambda,i}$  – удельные по концентрации показатели поглощения, рассеяния и рассеяния на угол  $\gamma$  частиц сорта  $i$  на длине волны  $\lambda$ , СМВ, СРОВ, СФП, – концентрации минеральных взвешенных (мв), растворённых органических (ров) веществ и фитопланктона (фп) соответственно,  $\Phi_{\lambda,i}$  – интеграл от индикаторы рассеяния, который воспроизводит долю света рассеянного в заднюю полусферу частицами сорта  $i$ . [12,13].

При ограниченном объёме экспериментальных СКСЯ возможно получать практически неограниченный массив СКСЯ с известными «опорными данными», входящими в качестве исходных данных в уравнение (3). Наличие такого массива СКСЯ позволяет выполнить большой объём модельных расчётов и, в результате, предложить новый подход к интерпретации дистанционных данных. Ранее интерпретация таких данных заключалась в построении биооптических моделей, связывающих концентрации ВК с величиной КСЯ в красной области спектра на двух или трёх длинах волн: 675, 705 нм, или 670, 710, 740 нм. В наших работах была высказана гипотеза о том, что СКСЯ (именно спектры во всём видимом диапазоне длин волн) несут в себе информацию об интегральных свойствах водной экосистемы и для понимания процессов, происходящих в водных экосистемах, необходимо использовать весь видимый диапазон спектра. Был предложен метод пространства оптических образов (ПОО).

ПОО строят на основе всевозможных экспериментальных СКСЯ видимой области электромагнитного спектра. Для получения ПОО со статистически устойчивыми свойствами, экспериментальные СКСЯ дополняют модельными спектрами [14,15], рассчитанными на основе теории переноса. Математически требование дополнения общего массива базисных экспериментально измеренных СКСЯ модельными необходимо для создания пространства с устойчивыми статистическими параметрами ПОО.

Для построения ПОО используют все имеющиеся экспериментальные СКСЯ и несколько тысяч модельных.

В общем случае, ПОО  $n$ -мерное. Реально его размерность определяется количеством каналов спектрометра: 512 или 1024. Но визуализация внутриводоёмных процессов возможна при построении траектории этого процесса в привычном для восприятия объёмном трёхмерном представлении.

Используя известные методы сжатия информации массив экспериментальных и модельных СКСЯ без значительной потери информации преобразуют в трёхмерный с обобщёнными координатами (OK) OK1, OK2, OK3. Три обобщённые координаты описывают более 90% дисперсии СКСЯ. Соответственно, считая, что форма СКСЯ связана и (или) определяется состоянием водной экосистемы, последовательное изменение формы СКСЯ в ПОО фактически является траекторией внутриводоёмного процесса ВО [16-18].

Кроме придания устойчивости ПОО, модельные СКСЯ, рассчитанные на основе известных спектров показателей поглощения и рассеяния при известных концентрациях видимых компонентов, позволяют построить изоплеты показателя поглощения фитопланктона  $\alpha_{\lambda, \text{ФП}}$  с известными  $C_{\text{ХЛ}}$ ,  $C_{\text{МВ}}$ , и в этом, проградуированном изоплетами ПОО, траектория изменения состояния водной экосистемы легко интерпретируема.

Проверка эффективности метода ПОО была проведена в экспериментах с модельными водными экосистемами – мезокосмами, организованными совместно с сотрудниками ГХИ [19]. Детальное рассмотрение вопросов, связанных с динамикой естественных и модельных водных экосистем, представлено в монографии [20] Параллельно протекающие в мезокосмах экосистемные процессы, отчетливо отражаются в СКСЯ и, дают возможность исследовать информативность дистанционных спектрометрических данных [21].

Используя метод ПОО были получены результаты, указывающие на цикличность внутриводоёмных процессов при большой, но разовой нагрузке загрязняющих веществ на экосистемы мезокосмов. При этом в экосистемах возникает краткопериодичный циклический процесс, т.е. искусственные экосистемы эвтрофного водоёма, подвергшиеся разовой нагрузке обладают достаточной самоочищающей способностью для возврата в естественное состояние. Этот процесс самоочищения оказывается смешённым относительно данных, полученных химическими методами (определение концентраций в воде загрязняющих веществ) на 4–6 суток. Постоянное же воздействие загрязняющих веществ в течение 16 дней не позволяет экосистеме возвратиться в естественное состояние. Во всяком случае, в течение 10 суток после прекращения внесения загрязняющих

веществ, возврат в «начальную» область не был зарегистрирован. Все эти процессы отчётливо отражаются в ПОО.

Аналогичный циклический процесс в ПОО наблюдали и в экосистеме реки Дон по оптическим данным в течение лета–осени 2001 г. [22–24]. Один из наиболее ярких результатов, демонстрирующих эффективность данных дистанционной спектрометрии, получен в эксперименте с модельными водными экосистемами в 2009 г.

В таблице приведены условия нагрузки мезокосмов в натурном эксперименте.

Номер мезокосма	Концентрации Cd <sup>2+</sup> , мкг/дм <sup>3</sup>	Количество ПДК (р/хоз)	Режим и сроки внесения, сут.
1	не вносили	0	не вносили
2	25	5	однократно в 1-е сутки
3	375	5+5+5+...+5=75	многократно (по 5 ПДК в течение 15 сут.)
4	50	10	однократно в 1-е сутки
5	125	25	однократно в 1-е сутки
6	250	50	однократно в 1-е сутки

ПДК кадмия 5 мкг/дм<sup>3</sup>

СКСЯ регистрировали ежедневно (за исключением отдельных дней, когда по техническим условиям съёмка представлялась невозможной) в течение всего времени эксперимента около 28 суток. На рис. 4 представлен график изменения обобщённой координаты ОКЗ, максимально коррелирующей с концентрацией фитопланктона для всех мезокосмов и материнской экосистемы [22].

Начиная с 3-их суток, траектории ОКЗ экосистем мезокосмов начинают незначительно различаться и «расходиться». Заметно это различие проявляется начиная с 9 суток эксперимента. Максимальные отличия возникают на 23 сутки. Затем траектории оптического образа экосистем показывают тенденции к сближению.

Такое поведение экосистем, изначально имеющих приблизительно одинаковый биохимический состав и практически одинаковое значение ОКЗ до внесения токсического загрязнения, вполне объяснимо. На начальном этапе, в первые сутки эксперимента, экосистемы подверглись существенно различному внешнему воздействию. Биота экосистем различно прореагировала на это воздействие, про-

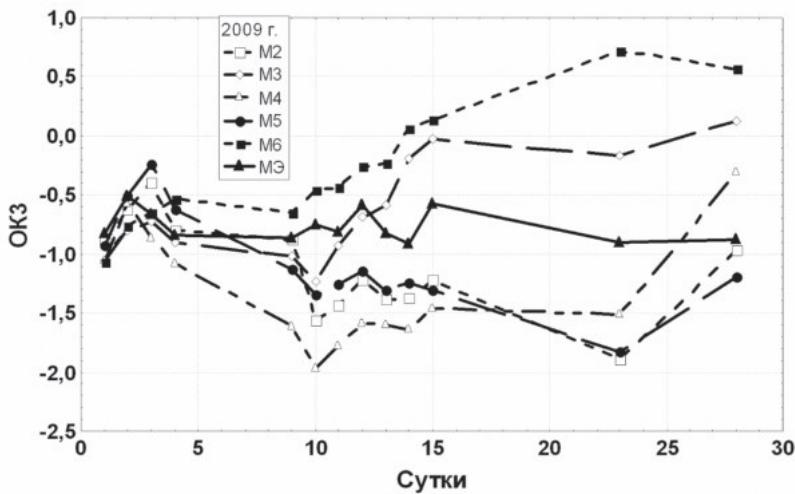


Рис. 4. Траектории ОК3 по данным дистанционной спектрометрической съёмки натурного эксперимента 2009 г.

цессы саморегулирования в каждой экосистеме пошли с различной интенсивностью. Экосистемы, 3-го и 6-го мезокосма начали погибать. Экосистемы 2-го, 4-го и 5-го мезокосмов наоборот, восприняли это загрязнение как стимулирующий фактор, что привело к бурному развитию планктона. Особо можно выделить поведение ОК3 4 мезокосма. Интенсивное развитие фитопланктона в нем отмечено уже на 4-е сутки эксперимента, достигает максимума на 10 сутки и затем отмечается медленное затухание развития экосистемы, приведшее к её угнетению, нарушению экосистемных связей в заключительной фазе эксперимента после 23 суток. Причина заключается, по-видимому, в истощении питательной базы планктона за счёт замкнутости и ограниченного объёма мезокосмов. Причем заметное угнетение наблюдается и у экосистем мезокосмов 2 и 5 после 23 суток, что проявляется в изменении их траекторий в направлении, противоположном развитию, тогда как траектория материнской экосистемы хотя и испытывает незначительные колебания, но даже в заключительной фазе значение ОК3 остаётся на уровне начала эксперимента и не показывает тенденций к какому-либо направленному изменению.

Пролонгированная нагрузка экосистемы 3-го мезокосма приводит к заметному угнетению развития планктона и приближению траектории этого мезокосма к траектории ОК3 экосистемы 6-го мезокосма, подвергшегося изначально шоковому воздействию токсиканта.

Такое поведение ОК экосистем мезокосмов на качественном уровне вполне ожидаемо и укладывается в рамки фундаментальных представлений о развитии экосистем – понимания механизма их гомеостаза и саморегуляции. По рис. 4 гомеостатическое плато всех экосистем находится в пределах траектории материнской экосистемы в районе ОК3=–1 по шкале ОК. Траектория первого мезокосма, не подвергавшегося загрязнению, находится вблизи этого плато. Более сильное загрязнение вызывает положительную обратную связь, невысокое загрязнение – отрицательную. Следует обратить внимание на то, что на заключительной стадии эксперимента экосистемы всех мезокосмов имели тенденцию к угнетению и, возможно, гибели за счёт истощения их питательного ресурса.

Таким образом, на данных дистанционных спектрометрических измерений в натурных экспериментах показано, что высокие (порядка 250 мкг/дм<sup>3</sup> и более) разовые или невысокие (около 25 мкг/дм<sup>3</sup>), но пролонгированные нагрузки приводят к нарушению экосистемных связей, ведущих к угнетению и возможной гибели экосистемы на ранней стадии воздействия токсиканта на водную экосистему.

Невысокие разовые нагрузки стимулируют развитие экосистем, но на заключительной стадии экосистемы мезокосмов гибнут за счёт исчерпания ресурса питательных веществ, причём тем быстрее и сильнее, чем более интенсивный всплеск их развития наблюдается на начальном этапе эксперимента. Время латентного периода достигало от 4 до 9 суток в зависимости от нагрузки мезокосмов, причем однозначной зависимости этого периода от величины нагрузки не отмечено.

При изучении поведения дистанционно зарегистрированных СКСЯ представленных в виде обобщённых координат можно делать выводы о направленности внутриводоёмных процессов, происходящих в экосистемах мезокосмов. При этом, если контролировать состояние экосистемы по концентрации загрязняющего вещества внутриводоёмные процессы в экосистемах зафиксировать невозможно.

Обобщая результаты измерений различных показателей, определяемых традиционными химическими методами, и результатов полученных методами дистанционной спектрометрии пришли к выводу, что при разовых воздействиях, порой чрезвычайно сильных, наблюдается возврат экосистем в начальное состояние динамического равновесия при запаздывании реакции экосистемы на внешнее воздействие от самого воздействия (естественного или антропогенного). Это явление, наблюдавшееся как в природных, так и в модельных водных экосистемах, названо экологическим гистерезисом [24].

Параллельно с развитием теоретической базы метода дистанционной спектрометрии проводились экспериментальные работы по изучению спектральных свойств водных объектов юга России. Результат работ – руководящий документ по проведению дистанционной спектрометрической съемки с мостовых переходов спектрометром S41 [25].

Начиная с 2009 г. и по настоящее время проводится регулярная съемка реки Дон ниже Ростова на-Дону (периодичность около 15 дней). Проводились съемки Цимлянского водохранилища, рек Волга, Кубань. Накопленные СКСЯ совместно с опорными данными, основной из которых Схема фитопланктона, позволили перейти к обобщению и систематизации экспериментально полученных данных. В результате для продуктивных ВО Юга России выделено 6 категорий СКСЯ и установлена связь между формой СКСЯ и трофическим статусом ВО. Перспективность подхода заключается в возможности оценки трофического статуса ВО или его части в реальном времени, буквально, во время проведения съемки. Кроме того, этот подход может быть использован при интерпретации космической информации получаемой гиперспектральной аппаратурой. (Ресурс-П, ГСА). Сопоставление СКСЯ нижнего уровня со спутниковым служит прямой проверкой качества спутниковых данных, которые проходят геометрическую и атмосферную корректировку [26]. Подана заявка на изобретение «Способ оценки трофности водных объектов» от 22 апреля 2016 г. Результаты работы последних лет связаны с дальнейшим углублением понимания процесса формирования СКСЯ, извлечением дополнительных данных о составе водных экосистем. Общепризнанный перечень видимых компонен-

тов может быть расширен за счёт добавления к нему фикоцианина, пигмента, характеризующего синезелёные водоросли, по которому возможно указывать на потенциальную токсичность вод экосистемы. Метод ПОО развит, с его помощью возможно определять фитопланктон различного таксономического состава.

### **Теоретические и прикладные аспекты изучения экотоксичности поверхностных вод биологическими методами**

В условиях современного антропогенного воздействия экосистемы водных объектов изменяются быстрее, чем накапливается информация об этих изменениях. Оценить в конкретный момент времени токсичность конкретного водного объекта позволяет метод биотестирования. Однако водные объекты регионов отличаются гидрохимией и составом гидробиоты в силу географических и климатических особенностей. В связи с этим отличаться будет и химизм загрязняющих веществ, и отклик гидробионтов. В последнее время отмечается усиление синэкологической ориентации токсикологических исследований. Оценить возможные варианты воздействия загрязняющих веществ на биоту, получить отклик гидробиоты и сделать прогноз развития водной экосистемы позволяет метод натурного моделирования загрязнения (мезокосмы). Подробное изложение методов и технических средств физического моделирования внутриводоёмных процессов представлены в работе [17].

Под научным руководством Никанорова силами Гидрохимического (Южного) отдела ИВП РАН в тесном сотрудничестве с ФГБУ «Гидрохимический институт» на протяжении многих лет проводятся комплексные исследования внутриводоёмных процессов в условиях натурного моделирования загрязнения. Работы проводились в мезокосмах, устанавливаемых непосредственно в исследуемом водном объекте. Исследования экотоксичности поверхностных вод в условиях натурного моделирования загрязнения проведено в вегетационные сезоны 20 лет в разнотипных водных объектах Нижнего Дона различной трофности: озёр Чалтырское и Койсуг, рукав реки Дон, временные водоёмы (пруды), заполняемые речной донской водой. В мезокосмах моделировали загрязнение диапазона концентраций тяжёлых металлов, взвешенных веществ, закисления водной среды. В ходе работ проводились теоретические проработки, экспе-

риментальные исследования на основе натурного моделирования загрязнения, съёмки и наблюдения (гидролого-гидрологические, химико-биологические, гидробиологические, токсикологические, спектрометрические) в реальных водных объектах Юга России.

Полученный большой фактический материал позволил сформулировать предложения к использованию методов биотестирования и биоиндикации при исследовании экотоксичности поверхностных вод.

- Необходим набор методов биотестирования, включающих тест-объекты, имеющие средой обитания исследуемую среду, т.е. вода и/или донные отложения.
- Приоритет должен быть отдан набору тест-объектов, охватывающих все возможные уровни среды и звенья трофической цепи (в случае водной среды – бактериальная флора, фитопланктон, микрозоопланктон (простейшие, коловратки), мезозоопланктон (ракковый планктон), планктоядные рыбы; в случае донных осадков – представители эпи- и эндофауны и флоры (донная микрофлора, фитобентос, макрофиты, простейшие, моллюски, черви).
- В качестве тест-объектов необходимо использование организмов, биология и экология которых достаточно хорошо изучена, а сами организмы должны легко культивироваться в лабораторных условиях.
- Окончательную оценку качества вод и донных отложений следует проводить по результатам комплекса методов биотестирования, включающими оценку водной среды, экстрактов донных осадков и показатели жизнедеятельности эпи- и эндобентонтов.
- Наиболее приемлемым методическим подходом изучения влияния загрязняющих веществ на гидробиоту является экосистемное моделирование загрязнения (микро- и мезокосмы).
- Решающим показателем для оценки токсичности является размножение. Этот показатель обеспечивает сохранность популяции. Данные по плодовитости при биоанализе природных вод необходимо получать быстро. В этом случае незаменимы гидробионты, имеющие короткий цикл развития. Из числа гидробионтов наиболее подходящими являются представители класса Rotifera (Rotifera, Коловратки) и т. Ciliophora (Инфузории).

В ходе мезокосменых исследований выявлены особенности воздействия кадмия на токсичность вод и состояние планктоценозов,

которые обусловлены более высокой щелочностью и температурой поверхностных вод южного региона. Восстановление pH среды в экспериментальных мезокосмах с разовой шоковой и хронической кислотной нагрузкой позволяло сохранять состав гидробиоты без резких изменений, что также связано с геологическими особенностями озёр, проявляющимися в их высокой буферной емкости. Реакция организмов планктона на воздействие граничащих (лимитирующих) значений pH среды укладывалась в рамки закона минимума Ю. Либиха и закона толерантности В. Шелфорда.

Результаты изложены в ряде публикаций и обобщены в монографии «Гидробионты в оценке качества вод суши» [27–31]. Разработана принципиальная схема использования биологических методов с гетерогенными коловратками [27; 32; 33].

Результаты исследований носили новаторский характер – получены патенты. Разработан способ биотестирования токсичности водной среды [34] и устройство для окрашивания организмов зоопланктона с целью дифференциации живых и мёртвых особей в фиксированных пробах [35].

Разработан ряд новых методик для Росгидромета по оценке токсичности вод и донных отложений с использованием нескольких тест-показателей коловраток, хемотаксиса инфузорий, коэффициента регенерации популяции, концентраций хлорофилла а, акцентировано внимание на «адресное» биотестирование токсичности и необходимость использования набора биотестов с тест-объектами разной систематической принадлежности и трофического уровня или набора тест-показателей одного тест-объекта [36–40].

Дана эколого-токсикологическая характеристика поверхностных вод ряда водных объектов юга России (на примере Ростовской области) комплексом биологических методов (биоиндикация и биотестирование): Цимлянского водохранилища, водотоков урбанизированных территорий (реки Темерник, Дон в черте мегаполиса Ростов-на-Дону, ручей федерального значения балки Рябинина), 18-ти малых рек бассейнов рек Тузлов и Северский Донец на углепромышленной территории Восточного Донбасса.

Результаты экспедиционных исследований на судне «Валаам» биоиндикационными и биотестовыми методами свидетельствуют о наличии процессов эвтрофикации и токсификации в Цимлянском

водохранилище, которые сопровождаются резкими колебаниями биомассы и видового состава всех отделов фитопланктона, трофности и токсичности вод. Сочетанное возрастание трофности (по данным биомассы и концентрации хлорофилла *a*), и что крайне важно, – токсичности вод (по данным биотестирования), свидетельствует о сохранении и усилении токсификации экосистемы Цимлянского водохранилища [41–43].

Токсическая нагрузка на экосистемы бассейна Нижнего Дона, в целом, сохраняется. Однако токсичность водных объектов неоднородна: наиболее высока у населённых пунктов и при использовании объектов в целях рекреации, снижается – после мероприятий по очистке водных объектов. В целом отмечено положительное влияние мероприятий по очистке реки Темерник, проведённое администрацией города, на токсическое состояние как реки Темерник, так и участков реки Дон после впадения реки Темерник [44–50].

Метод биотестирования адекватно отражает токсикологическую ситуацию в водных объектах до и после комплекса мероприятий по их очистке, после рекреационной нагрузки. Интегральная оценка токсичности вод, получаемая методом биотестирования, во-первых, показывает реальный уровень токсичности водной составляющей экосистем (от острого токсического действия до его отсутствия); во-вторых, является мобильным откликом водной экосистемы на суммарное воздействие всего комплекса содержащихся в ней загрязняющих веществ; в-третьих, может служить скринингом при выборе проб для последующего дорогостоящего химического анализа; в-четвертых, может служить основой для принятия управлеченческих решений в условиях чрезвычайных ситуаций.

В условиях стабильно высокого уровня загрязнения метод биотестирования служит реальным инструментом оценки токсичности вод водных экосистем и его можно рекомендовать к постоянному наблюдению за токсичностью водных экосистем.

На протяжении многих лет природный комплекс Восточного Донбасса подвергается интенсивному техногенному воздействию, в связи с чем является одним из наиболее проблемных в экологическом отношении регионов РФ. Основной вклад в осложнение здесь экологической ситуации вносят предприятия угольной промышленности. Начавшаяся в 1990-е гг. реструктуризация угледобывающей

отрасли, основу которой составляет ликвидация нерентабельных шахт, заметно усилила негативные явления. При этом особенно высокую техногенную нагрузку испытывают поверхностные воды региона. Наиболее уязвимыми оказались малые реки. Впервые в ходе комплексных экспедиций получены новые данные о токсичности проб вод и донных отложений малых рек бассейнов рек Тузлов и Северский Донец, находящихся на территории шахт, затопленных «мокрым способом». Одна и та же пробы вод и донных отложений оказывала различное по уровню токсическое действие на разные тест-объекты, что связано с экологическими особенностями используемых тест-объектов. Выявлено, что количество проб токсичных вод и донных отложений выше в реках бассейна реки Северский Донец, чем в бассейне реки Тузлов. Наиболее токсичны воды и донные отложения в устьях рек и ниже мест выхода техногенных шахтных вод. Фильтрованные пробы вод не оказывали токсическое действие. В связи с этим необходимо изучение химического состава взвесей, поскольку именно в них могут содержаться токсичные соединения.

Разработаны схемы использования биологических методов для оценки экотоксичности поверхностных вод с учётом специфики углепромышленных территорий и сельскохозяйственной направленности региона. Изложены в статьях [51–53] и обобщены в монографии [54].

Проведённые исследования и полученные результаты показали перспективность комплексного подхода при изучении внутриводоёмных процессов. Многие результаты являются уникальными и получены впервые. Требуется продолжение работ в этом направлении для развития методологии изучаемого процесса.

Полученные материалы могут быть использованы специалистами, научными и руководящими работниками в сфере мониторинга водных объектов и других системах государственного мониторинга.

Продолжаются теоретические и экспериментальные работы по разработке метода оценки экотоксичности поверхностных вод суши биологическими методами: по показателям природного планктона и монокультур тест-объектов и оценке изменений экотоксичности водных экосистем малых рек бассейна нижнего Дона.

Разрабатываемый метод основан на результатах собственных многолетних натурных и экспериментальных исследований в области разработки методов анализа и оценки загрязнённости пресноводных экосистем по биологическим показателям, а также анализе имеющегося литературного материала и существующих нормативно-методических документов. Дальнейшая работа над методом требует разработки соответствующих шкал оценки экотоксичности вод по комплексу результатов биоиндикации природного планктона и биотестирования вод на монокультурах тест-объектов и последующей апробации.

Наиболее значимыми обобщающими научными работами этого периода являются монографии Никанорова: «Мониторинг качества вод: оценка токсичности» (2000 г.), «Растворённые и подвижные формы тяжёлых металлов в донных отложениях пресноводных экосистем» (2001 г.), «Локальный мониторинг загрязнения водных объектов в районах высоких техногенных воздействий топливно-энергетического комплекса» (2002 г.), «Научные основы мониторинга качества вод» (2005 г.), «Пресноводные экосистемы в импактных районах России» (2006 г.), «Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем» (2008 г.), «Гарантии и контроль качества гидрохимической информации» (2009 г.), «Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций» (2012 г.), «Методы экспериментальной гидроэкологии» (2012 г.), учебники «Гидрохимия» (1985, 1989, 2001, 2008 гг.), учебные пособия «Региональная гидрохимия» (2011 г.) и «Фундаментальные и прикладные проблемы гидрохимии и гидроэкологии» (2015 г.), Словарь-справочник по гидрохимии и качеству вод суши (понятия и определения) (2015 г.).

Монография Никанорова «Научные основы мониторинга качества вод» – первая и единственная в мире крупная научно-методологическая работа в данной области, которая охватывает теоретические и практические аспекты организации и ведения основных видов мониторинга водных объектов. Эта монография вместе с учебником автора «Гидрохимия» отмечена престижной наградой Российской академии наук – премией Ф.П. Саваренского за выдающиеся работы в области исследования вод суши (2010 г.). Монография переведена на английский язык и опубликована издательством

Nova publishers New York под названием «Monitoring of Water Quality (Scientific and Applied Aspects)» в августе 2013 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хоружая Т.А., Минина Л.И. Оценка экологического состояния Цимлянского, Пролетарского и Веселовского водохранилищ // Метеорология и гидрология. №5, 2017. С. 116–122.
2. Коханистая Е.В., Хоружая Т.А. Современный уровень солевого загрязнения Пролетарского и Веселовского водохранилищ // Известия вузов Северо-Кавказского региона. Ростов-на-Дону, №2, 2015. С. 88–92.
3. Хоружая Т.А., Мартышева Н.А. Связана ли токсичность воды водохранилищ с синезелёными водорослями // Вода: химия и экология, №7, 2014. С. 98–105.
4. Хоружая Т.А., Юрасова Е.Б. Оценка токсичности природных вод Пролетарского и Веселовского водохранилищ / Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод. Материалы науч. конф. 8–10 сент 2015 г. Ростов-на-Дону. С. 145–148.
5. Никаноров А.М., Хоружая Т.А. Внутриводоёмные процессы в крупных водохранилищах юга России: загрязнение, эвтрофирование, токсификация // География и природные ресурсы. №2, 2014. С. 35–43.
6. Хоружая Т.А., Мартышева Н.А., Юрасова Е.Б. Методы оценки токсического влияния фитоценозов планктона на формирование качества поверхностных вод суши. РД 52.24.809-2014. Авт.
7. Хоружая Т.А. Использование биотестирования токсичности в оценке качества воды, загрязнения и эколого-токсикологического состояния поверхностных водных объектов // Биодиагностика и оценка качества природной среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии: Материалы международного симпозиума, МГУ, 25–28 октября 2016 г. М.: ГЕОС, 2016. С. 248–251.
8. Хоружая Т.А. Российские технологии экологической оценки состояния поверхностных водных объектов, основанные на биотестировании токсичности // Сборник научных трудов SWorld. Вып. 3(36). Т. 29. Биология. Материалы заочной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития». Одесса, КУПРИЕНКО СВ, 2014. С. 43–46.
9. Хоружая Т.А. Интегральная оценка состояния экологического благополучия водохранилищ и возможности её использования в мониторинге. Материалы XIII Международного научно-практического симпозиума «Чистая вода России», 17–19 марта 2015 г.
10. Хоружая Т.А., Минина Л.И. Мартышева Н.А. Оценка состояния пресноводных экосистем по комплексу химико-биологических показателей. Р 52.24.763-2012.
11. Хоружая Т.А., Минина Л.И. Проявление признаков экологического бедствия на крупных водохранилищах юга России // Сборник научных трудов Всероссийской научн. конф. «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»

6–11 июля 2015 г. Т. 1. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 379–385.

12. Sukhorukov B.L., Garbuzov G.P., Akawiec A.A. Model calculations of brightness coefficients spectra for the interpretation of the spectrometric data on fresh water quality // Seventh Int. Symp. «Atm. and Ocean Optics». Proc. SPIE., Vol. 4341, 2000. P. 503–510.

13. Сухоруков Б.Л., Гарбузов Г.П., Никаноров А.М. Оценка состояния водных объектов по спектрам коэффициента яркости // Водные ресурсы. №5, 2000. С. 579–588.

14. Сухоруков Б.Л., Новиков И.В. Сравнительный анализ двух способов интерпретации дистанционных спектрометрических данных о состоянии водных экосистем // Оптика атмосферы и океана. Т. 14, №10, 2001. С. 944–949.

15. Sukhorukov B.L., Novikov I.V. The information content of spectra of the brightness coefficients for water ecosystems // Eights Int. Symp. «Atm. and Ocean Optics». Proc. SPIE., Vol. 4678, 2001. P. 344–351.

16. Сухоруков Б.Л., Новиков И.В., Никаноров А.М. Использование пространства оптических образов для интерпретации данных дистанционных спектрометрических измерений в пресноводных экосистемах // Вестник ЮНЦ РАН. №3, 2006. С. 25–32.

17. Трофимчук М.М., Бакаева Е.Н., Сухоруков Б.Л. Фазовые портреты водных объектов при натурном моделировании экосистемных процессов // Вестник Южного научного центра РАН. №2, 2010, С. 28–37

18. Никаноров А.М., Трофимчук М.М., Сухоруков Б.Л. Методы экспериментальной гидроэкологии: монография, Ростов-на-Дону, «НОК», 2012. 350 с.

19. Сухоруков Б.Л., Новиков И.В. Информативность спектров яркости в видимом спектре в натурном эксперименте с экосистемами эвтрофных водоёмов // Материалы III Всероссийской конференции по водной токсикологии (Борок, 11–16 ноября 2008 г.). Ч.3. ООО «Ярославский печатный двор», Борок, 2008. С. 126–130.

20. Сухоруков Б.Л., Никаноров А.М. Цикличность внутриводоёмных процессов по данным дистанционной спектрометрии в эвтрофных водоёмах // Доклады РАН. Т. 400, №3, 2005, 378–381. (Пер.: Sukhorukov B.L., Nikanorov A.M. Cyclic patterns of intrabasin processes inferred from remote sensing spectrometry in eutrophic basins / Doc. Earth Sci. V.400, №1. 2005. P. 132–135).

21. Sukhorukov B.L., Nikanorov A.M. Cyclic Recurrence of Intrareservoir Processes with Anthropogenic Impact on Freshwater Ecosystems // Aquatic Ecosystems, 2011. Nova Science Publishers, Inc, Ed. Sheila A. Brown. Chept. 5, 27. Pp. 169–194. ISBN: 978-1-613244-399-2.

22. Сухоруков Б.Л., Новиков И.В. Гомеостаз водных экосистем по данным дистанционной спектрометрии // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы школы-семинара: «Современные методы исследования и оценки качества вод, состояния водных организмов и экосистем в условиях антропогенной нагрузки». Материалы IV научной конференции (24–29 сентября 2011). Ч. 1. Борок, 2011. С. 59–63.

23. Никаноров А.М., Сухоруков Б.Л. Об экологическом гистерезисе // Доклады академии наук. Т. 422, №6, 2008. С. 811–814. (Пер.: Nikanorov A. M., Sukhorukov B.L. Ecological Hysteresis // Doclady Earth Science. Vol. 423, №8, 2008. Pp. 1282–1285).
24. РД 52.24.729.2010 Дистанционная спектрометрическая съёмка водных объектов в видимом диапазоне волн с мостовых переходов. Ростов-на-Дону, 2010. 22 с.
25. Р 52.24.844–2016. Оценка трофического статуса водных объектов по дистанционной спектрометрической информации видимого диапазона электромагнитного спектра. Ростов-на-Дону, 2016. 14 с.
26. Сухоруков Б.Л., Ковалёва Г.Е. Новиков И.В. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектрометрии высокого разрешения видимого диапазона // Водные ресурсы. Т. 44, №1, 2017. С. 79–90.
27. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А. Место биотестовых исследований донных отложений в мониторинге водных объектов Вестник Южного научного центра. Т. 5, №2, 2009. С. 84–94.
28. Трофимчук М.М., Бакаева Е.Н., Сухоруков Б.Л. Фазовые портреты водных объектов при натурном моделировании экосистемных процессов Вестник Южного научного центра. Т. 6, №2, 2010. С. 28–38.
29. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Натурное моделирование загрязнения водных экосистем. Оценка экотоксичности: Материалы конф. междунар участием «Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС)». Дюрсо, 8–14 сентября 2013.
30. Бакаева Е.Н., Черникова Г.Г., Тарадайко М.Н. Изменение структурных и пигментных характеристик фитопланктона под влиянием кадмия // Сборник статей «Экология. Экономика. Информатика». Т. 1 «Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС)». Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. 2015. С. 41–47.
31. Бакаева Е.Н., Тарадайко М.Н. Экотоксичность вод модельных экосистем в условиях загрязнения кадмием // Водные ресурсы: изучение и управление (лимнологическая школа-практика) Материалы V Международной конференции молодых ученых (5–8 сентября 2016 г.). Т. 2, Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. С. 105–113.
32. Тарадайко М.Н., Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Токсичность вод по показателям природного зоопланктона и монокультуры беспозвоночных в условиях влияния кадмия / Актуальные проблемы наук о Земле: сборник трудов II научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием // Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. С. 474–477.
33. Бакаева Е.Н. Методико-методологические аспекты биотестирования вод с использованием гидробионтов, обладающих гетерогонией Материалы III Всероссийской конференции по водной токсикологии «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». Ч. 3. ООО «Ярославский двор», Борок, 11–16 ноября 2008. С. 3–5.

34. Патент на изобретение №2462707 Способ биотестирования токсичности водной среды [Текст] / Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А. 27.09.2012. Бюл. №27.
35. Патент Российской Федерации, Полезная модель, МПК G01N 33/18. Устройство для окрашивания организмов зоопланктона с целью дифференциации живых и мёртвых особей в фиксированных пробах [Текст] / Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А., Циркунов В. А.; заявл. 15.08.2013; опубл. 20.09.2014, Бюл. №26. – 2 с.: 1 ил.
36. Никаноров А.М. (руководитель разработки), Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Ходурская Л.М. Оценка токсического загрязнения природных вод и донных отложений пресноводных экосистем методами биотестирования с использованием коловраток РД 52.24.662-2004. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. 60 с.
37. Никаноров А.М. (руководитель разработки), Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Унифицированные методы биотестирования для обнаружения токсического загрязнения поверхностных вод суши с использованием микрозоопланктона РД 52.24.669-2005. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. С. 6-28.
38. Никаноров А.М. (руководитель разработки), Бакаева Е.Н., Черникова Г.Г., Игнатова Н.А. Оценка токсического загрязнения природных вод и донных отложений водных экосистем по коэффициенту регенерации популяции Р 52.24.695-2007. Ростов-на-Дону: Росгидромет ФГБУ «ГХИ», 2008. 21 с.
39. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Оценка токсичности поверхностных вод суши в условиях чрезвычайных ситуаций методом экспрессного биотестирования РД 52.24.741-2010. Ростов-на-Дону: Росгидромет ФГБУ «ГХИ», 2011. С. 67-90.
40. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г. Оценка токсичности поверхностных вод суши методом биотестирования с использованием хлорофилла а. Р 52.24.808-2014 Ростов-на-Дону: Росгидромет ФГБУ «ГХИ», 2014. 23 с.
41. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Экотоксичность вод Цимлянского водохранилища в период цветения сине-зелёных микроводорослей // Глобальная ядерная безопасность. №4, 2012. С. 114–20.
42. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г. Экологотоксикологическая ситуация Цимлянского водохранилища в современный период // Всероссийская научная конференция «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике» (г. Цимлянск, 23–28 июля 2012 г.) Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012, С. 151–157.
43. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Качество вод приплотинной части Цимлянского водохранилища в условиях цветения сине-зелёных микроводорослей // Глобальная ядерная безопасность. №1, 2013. С. 23–29.
44. Бакаева Е.Н., Остапова Н.И. Экотоксичность вод эвтрофных водохранилищ // Сборник материалов Всероссийской научной конференции «Механизмы устойчивости и адаптации биологических систем к

природным и техногенным факторам» (22–25 апреля 2015 г.). Киров: Изд-во ООО «ВЕСИ», 2015. С. 338–342.

45. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Эколо-токсикологическое состояние нижнего течения р. Дон Материалы III Всероссийской конференции по водной токсикологии «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». Ч. 3. ООО «Ярославский двор», Борок. 11–16 ноября 2008. С. 193–197.

46. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Динамика токсичности вод и донных отложений водного объекта рекреации Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». №6, 2011.

47. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г., Рудь Д.А. Токсичность вод и донных отложений урбанизированного участка реки Темерник (г. Ростов-на-Дону, ЮФО) // Современные проблемы науки и образования. №2, 2013.

48. Бакаева Е.Н. токсичность вод и донных отложений урбанизированного участка реки Темерник (г. Ростов-на-Дону, ЮФО) // Современные проблемы науки и образования. №2. Издательство: Издательский Дом Академия Естествознания (Пенза), 2013. С. 408. ISSN: 1817-6321.

49. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Динамика токсичности вод малой реки в пределах мегаполиса (р. Темерник, ЮФО) // «Живые и биокосные системы». №7, 2014.

50. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова Н.А. Анализ токсичности поверхностных вод бассейна Нижнего Дона в черте г. Ростов-на-Дону по многолетним данным биотестирования // Водные ресурсы. Т. 41, №1, 2015. С. 70–77.

51. Бакаева Е.Н., Никаноров А.М. Биологические подходы к оценке экотоксикологического состояния водных экосистем // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. №1, 2015. С. 72–83.

52. Бакаева Е.Н. Тарадайко М.Н. Экотоксичность поверхностных вод бассейна реки Северский Донец (Ростовская область) по результатам набора биотестов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. №4, 2016. С. 57–61.

53. Bakaeva E., Sklyarenko G., Taradayko M., Kondakova M. «Method of assessment of water ecosystems based on ecotoxicological approach in relation to the specifics of coal mining areas of Rostov region (Russia)» SGEM VIENNA GREEN 2016, Book 3, Vol.3, DOI 10.5593/SGEM2016/HB33/S02.024.

54. Закруткин В.Е., Скляренко Г.Ю., Бакаева Е.Н. и др. Поверхностные и поземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. 172 с.

## **Развитие медико-экологических исследований водных проблем в ИВП РАН**

*Л.И. Эльпинер*

Разработка научных основ медико-экологического подхода. Исторически, потребность медико-экологической оценки и прогнозирования влияния гидрологической обстановки на здоровье населения возникла в ИВП АН СССР (ныне ИВП РАН) в связи с необходимостью расширения диапазона исследований водных проблем, обозначившейся в 1970-е гг., при изучении крупномасштабного гидротехнического проекта. Именно здесь впервые возникла острая необходимость комплексной оценки последствий радикального изменения режима, количества и качества вод.

В основу исследований был положен сформированный комплексный междисциплинарный природоведческий и медико-биологический подход, далее получивший признание на отечественных и на международных научных форумах как подход медико-экологический [2]. Для этого подхода к обоснованию профилактических мероприятий было важно широкое понимание условий формирования здоровья человеческой популяции и его патологических отклонений в связи с внутри- и внеорганизменными предпосылками. Последние своими корнями связаны с особенностями динамики среды обитания и более масштабными биосферными процессами, обусловливающими онто- и филогенетические эволюционные процессы, свойственные виду *Homo Sapiens* и зависящие, как очевидно, от сложнейших генетических, биоэнергетических и бiorитмических механизмов, развивающихся на экологическом и социально-экономическом фоне и ими корректируемых. Основы представлений такого рода, заложенные ещё В.И. Вернадским и А.Л. Чижевским, послужили для разработки новых концепций, которые позволили бы замкнуть в единое целое системы знаний об организме, популяции, биосферных и внебиосферных процессах. Ёмкость такого подхода определяет роль, место и задачи современной профилактической медицины, выводя её на платформу междисциплинарных научных подходов [24, 29]. Недооценка этого принципиального положения при обосновании профилактических мероприятий здравоохранения, в основном, лишь

на уровне снижения интенсивности болезнестворно-активных факторов окружающей среды в зоне их прямого взаимодействия с организмом человека во многом определяла ограниченную эффективность профилактических мер здравоохранения и, как следствие, нарастающий характер заболеваемости, обусловленный усиливающимися антропогенными трансформациями природной среды, заболеваемости как инфекционными, трансмиссионными, так и неинфекционными заболеваниями. Сущность сформировавшегося медико-экологического направления в подходах к определению и оценке последствий изменений гидрологической обстановки состояла прежде всего в построении медико-экологических прогнозов на основе выявления причинно-следственных связей возможных изменений санитарных условий жизни, состояния здоровья населения и изменений природной среды как в самом водоёме, так и на территории зоны его влияния[19, 22, 24].

Для решения этой сложной, многофакторной задачи оказалось возможным использование множественной информации, накопленной интенсивно развитыми исследованиями в области гигиены, эпидемиологии, паразитологии, санитарной гидробиологии, экологии суши, гидрологии и гидрохимии, гидрогеологии и некоторых других дисциплин. Методологически они были замкнуты в единой системе при оценочных и прогностических построениях, базирующихся на медико-экологических интерпретациях положений смежных дисциплин. В процессе развития методологии данного направления исследований были адаптированы современные методы оценки риска для здоровья населения при воздействии веществ, загрязняющих окружающую среду [18], что значительно уточняло доказательства причинно-следственных связей различных видов заболеваний с воздействием водного фактора. Важно отметить развитую математическую основу этой методики, всё шире используемой в развитых странах.

Следует подчеркнуть, что предложенный в ИВП подход отличала природоведческая основа, дающая возможность прогнозирования последствий изменений гидрологической обстановки для условий жизни и состояния здоровья населения с учётом экологических факторов, влияющих на динамику развития человеческой популяции. Одновременно этот подход открывал возможности примене-

ния оцениваемых критерииев при анализе изменений состояния экосистем воды и суши [27,44].

Разработке научных основ этого направления исследований предшествовала оценка роли водного фактора в формировании состояния здоровья населения и санитарных условий его жизни [24]. Посвящённый этому вопросу широкий круг публикаций свидетельствовал о наличии тесных связей ряда кишечных инфекций с использованием микробиально загрязнённых вод, связей неинфекционных заболеваний (сердечно-сосудистой, выделительной, нервной и других систем организма человека), вызываемых наличием антропогенного загрязнения и особенностями природного состава используемых вод.

Наиболее сложные задачи были сосредоточены в проблеме медико-экологической оценки характера изменений режима, количества и качества вод и трансформаций экосистем воды и суши в связи с меняющейся гидрологической обстановкой. Влияние последней на функциональное состояние экосистем было очевидно для биологов. От неё зависят такие важнейшие процессы, как самоочищение воды, биоаккумуляция, биотрансформация и биодеградация загрязняющих веществ, определяющие и возможности прямого хозяйствственно-питьевого и рекреационного использования водных объектов. Неблагоприятное развитие этих процессов определяет интенсивность влияния микробной и токсической составляющих водного фактора. Прямым следствием ухудшения качества воды здесь является возможность развития инфекционных заболеваний и интоксикации, нарушений механизмов наследственности, влияющих на популяционные характеристики здоровья [27].

К медико-экологическому направлению исследований ИВП следует отнести и совершенно новый практически важный раздел актуальной проблемы охраны водных ресурсов и водной токсикологии – лекарственное загрязнение природных и сточных вод. Проведение этих исследований, выполненных под руководством доктора физико-математических наук, профессора, известного крупного специалиста в области медицинской биофизики Г.М. Баренбойма, впервые установило наличие в РФ лекарственного загрязнения вод и вытекающих из этого экологических рисков для человека и гидробиоты. Показана необходимость принятия специальных мер нор-

мотворческого характера по уменьшению лекарственного загрязнения, а также улучшение существующего законодательства и подзаконных актов, связанных с регламентом обращения с отходами, обращением с лекарствами и т.д., что может заметно снизить экологические риски ксенобиотического загрязнения, обладающего лекарственной активностью [5].

Излагаемые далее в настоящей статье материалы отражают содержание основных медико-экологических исследований ИВП, проведенных в рамках работ по изучению крупных фундаментальных водных проблем с использованием разработанного научного подхода.

Крупномасштабное территориальное перераспределение водных ресурсов. Речь идет о проекте переброски части стока северных (Печора) и сибирских рек (Обь, Иртыш) в бассейны Волги и Дона (на ЕТС), а в азиатской части страны – в Аральский регион (бассейны рек Амудары и Сырдары). К концу 1970-х гг. гидротехнические разделы этого одиозного проекта были, в основном, уже созданы, однако экономические, социальные и медицинские проработки практически отсутствовали.

Разработанная в ИВП и реализованная под руководством института программа медико-экологических исследований этой проблемы обеспечила согласованное развитие комплексных работ, в которых участвовали 22 научно-исследовательских и образовательных (центральных и региональных) институтов системы здравоохранения и Академии медицинских наук, а также крупные местные организации санэпидслужбы. Решение этой проблемы потребовало от исполнителей специальных методологических и методических разработок [8]. Оказалось возможным оценить медико-биологическую обстановку, зависящую от водного фактора на ряде локальных территорий страны, и, опираясь на гидрологические, гидрогеологические, гидрохимические, гидробиологические и зооботанические прогнозы, оценить возможные её изменения, учитывая при этом и планы народнохозяйственного развития. Был сформулирован и ряд конкретных рекомендаций, касающихся предотвращения или смягчения выявленных негативных последствий предлагавшихся водохозяйственных решений, вплоть до отклонения тех или иных гидротехнических вариантов.

Нельзя не отметить, что «... проект разворота рек вспять был типичным проявлением советской гигантомании. Это было продолжение сталинской политики покорения природы, когда, во-первых, совершенно отсутствовало какое-либо серьёзное понимание экологических проблем, а во-вторых, был исключён из рассмотрения вопрос об экономической целесообразности» (из интервью член-корреспондента РАН, директора ИВП В.И. Данилова-Данильяна). Предварительная стоимость только сибирской части проекта (водоподача, распределение, сельхозстроительство и освоение, объекты АПК), равнялась 32,8 млрд рублей [17]. Однако, было бы несправедливым не отметить беспрецедентное, не имеющее мировых аналогов по своему масштабу, комплексирование (на базе единой государственной программы) разнодисциплинарных, но смежных по направленности научных исследований, часто выходящих далеко за рамки узких проектных проработок. Так, периоду формирования и развития медико-экологических исследований, проведённых применительно к проекту перераспределения стока северных и сибирских рек, уже предшествовал целый ряд гидрологических, гидрогеологических, гидротехнических, гидробиологических, гидрохимических проработок, материалы которых были столь необходимы для реализации прогнозного медико-экологического подхода.

Первоначально они были выполнены применительно к обоснованию экспертных оценок [2], получив далее более глубокое развитие. Применительно к проблеме перераспределения водных ресурсов, результаты проведенных работ выявили вероятность появления ряда крайне нежелательных последствий, связанных с территориальным перераспределением с водными потоками ряда токсичных веществ, патогенных микроорганизмов, возможность усугубления эпидемической ситуации по кишечным инфекциям, ухудшения паразитологической обстановки за счёт расширения ареалов обитания возбудителей и переносчиков трансмиссивных заболеваний. Весьма негативны оказались возможные изменения санитарных условий водопользования и общей санитарно-эпидемиологической обстановки в условиях использования антирек, в устьевых зонах крупных водотоков за счёт расширения зоны проникновения галлоклина. Нерешённой оказалась проблема изменения природного состава воды водоисточников за счёт смешения вод разных гидрохи-

мических классов, что выдвигало необходимость проведения специальных и весьма сложных исследований физиологической полноценности питьевых вод [23].

Обобщение результатов проведённых работ поставило под сомнение возможность реализации самой идеи перераспределения стока, выдвинув на первый план необходимость опережающих полнообъёмных водоохраных и медико-профилактических мероприятий, соизмеримых по стоимости с огромными затратами на гидротехнические работы. Также был высказан ряд соображений, касающихся вероятных негативных изменений условий жизни населения в связи с трансформациями природной среды обитания человека – изменениями миграционных потоков, трудовой занятости, пищевой обеспеченности, наконец, климатических условий [24]. Сочетание этих выводов с резко отрицательным мнением крупных экологов, социологов, экономистов и явились причиной закрытия проекта переброски на государственном уровне.

Однако, для развития учения об управлении водными ресурсами, во всяком случае, для его медико-экологических аспектов, постановка и проведение развернутых комплексных междисциплинарных исследований сыграла, несомненно, прогрессивную роль. Прежде всего, это касалось разработки научных основ, методологии и методов прогнозирования медико-экологических последствий гидротехнического строительства.

Гидротехническое строительство. Проведённые исследования позволили впервые в отечественной научной литературе рассмотреть вопросы создания, реконструкции и эксплуатации крупных водных объектов (каналов, водохранилищ) под новым углом зрения, отличным от ранее принятого ограниченного санитарно-гигиенического подхода. Речь шла о необходимости рассмотрения положительных и отрицательных сторон создания зарегулированных водотоков не только с точки зрения изменений санитарных условий водопользования населения, но и с позиций влияния на состояние его здоровья по эпидемиологическим и паразитологическим показателям, зависящих от антропогенных изменений гидрологической обстановки в целом [19].

Общеизвестны положительные социально-экономические последствия гидростроительства, способствующие улучшению

условий труда, быта и отдыха людей и снижению в этой связи общей заболеваемости. Вместе с тем в целом ряде случаев существенные и негативные последствия создания водохранилищ – ухудшение эпидемиологической и паразитологической обстановки, качества воды питьевых водозаборов, ухудшение некоторых климатических параметров, повышение уровня стояния грунтовых вод, замена привычного вида трудовой деятельности значительных контингентов населения, изменение характера его питания. [6,7]. Все эти факторы также влияют на состояние здоровья и общую заболеваемость населения. В связи с этим огромное значение приобретало объективное изучение и прогнозирование многообразных последствий воздействия водохранилищ на природу, хозяйство, население и его здоровье [14]. Это было необходимо для всесторонней оценки хозяйственной целесообразности создания того или иного водохранилища для определения очерёдности гидротехнического строительства (как в целом по стране, так и в отдельных речных бассейнах), для оптимального выбора основных параметров гидротехнических сооружений и в первую очередь отметки нормального подпорного уровня (НПУ) водохранилища и места расположения; для установления оптимального для хозяйственных нужд режима эксплуатации гидроузла и водохранилища; для максимального использования положительных и ограничения или исключения отрицательных последствий создания водохранилища (в том числе определения необходимого состава и объёма мероприятия, направленных на обеспечение благоприятных условий жизни и здоровья населения).

При разработке основополагающей концепции этой части исследований было показано, что интересы жизнеобеспечения и охраны здоровья населения в связи с антропогенными изменениями гидрологической обстановки требуют принципиально нового подхода для обеспечения медико-экологических прогнозов. Для решения этой сложной многофакторной задачи оказалось возможным использование многоаспектной информации в области гигиены, эпидемиологии, паразитологии, санитарной гидробиологии, экологии суши, гидрологии и гидрохимии, гидрогеологии и некоторых других дисциплин. Исследования, проведённые в комплексе с институтами медико-профилактического профиля (НИИ гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, ИМПИТМ им. Е.И. Марциновского, ЦНИИ эпи-

демиологии МЗ СССР, НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалея АМН СССР, НИИ общей и коммунальной гигиены АМН СССР) позволили разработать научные основы и принципиальные методы медико-экологического прогнозирования последствий гидротехнического строительства. Итоги этой работы оформлены в виде специального руководства, изданного Научным Советом РАН по проблемам биосферы [19], отражены в отдельных главах двух крупных коллективных монографий, посвящённых водохранилищам. [6,7].

Разработанная методология прогнозов позволяет обосновывать и закладывать в проектные проработки гидротехнического строительства и планы связанного с ним народнохозяйственного развития мероприятия по усилению положительных и предотвращению или ослаблению возможных негативных влияний гидрообъектов на медико-экологическую обстановку. Они включают в себя набор наиболее правильных гидротехнических решений, обеспечивающих в новых и преобразуемых водных объектах такой водный режим и качество вод, которые исключают или снижают возможности появления отрицательных для здоровья населения эффектов. Здесь же были сформулированы и основы мероприятий, предупреждающих возможные негативные последствия [3].

Разработанный подход в дальнейшем был успешно использован при оценке возможных медико-экологических последствий реализации проекта Красногорского гидроузла с созданием руслового водохранилища в районе г. Омска в связи с сокращением стока Иртыша. Исследования проведены совместно с автором проекта – институтом «Мособлгидропроект» [32]. Полученные материалы свидетельствовали о необходимости проведения ряда мероприятий в случае положительного решения о его создании: (проведение водоохраных мероприятий до введения водохранилища в эксплуатацию на основе специального комплексного плана заинтересованных организаций (интенсификация контрольных и профилактических мероприятий органов Роспотребнадзора в связи с опасностью распространения отдельных инфекционных и паразитарных заболеваний). Было сформулировано предложение о создании в Омской области специальной службы межведомственного комплексного мониторинга для слежения за экологической, гидро-

логической, санитарно-эпидемиологической обстановкой в зоне влияния водохранилища в целях своевременной информации эксплуатирующих и контролирующих организаций, и принятия предупредительных мер. В связи с возможным возникновением чрезвычайных ситуаций, связанных с несанкционированными или залповыми сбросами сточных вод на сопредельных территориях, было рекомендовано создание специального подразделения, владеющего соответствующими приемами и оборудованием для предупреждения распространения загрязнений в акватории водохранилища. Важным явилось предложение о необходимости разработки Генеральной схемы охраны и рационального использования водных ресурсов р. Иртыш. Результаты проведённых исследований имеют прямое негативное отношение к возрождающимся идеям трансграничной переброски части стока сибирских рек на сопредельные зарубежные территории.

Медико-экологическое районирование территории. Проведённые исследования позволили перейти к следующему этапу разработок медико-экологического прогнозирования: оценке последствий изменений гидрологической обстановки, т.е. при более широком диапазоне явлений, далеко выходящих за рамки влияния гидротехнического строительства. Целью медико-экологического районирования является оценка факторов риска заболеваемости населения, прямо или косвенно связанной с использованием вод для хозяйствственно-питьевых целей. Решаемые при этом задачи связаны с необходимостью уяснения характера и степени влияния качества и количества вод на состояние здоровья населения.

Для развития методологии такого прогнозирования, а конкретнее, для получения необходимого банка исходных данных, существенное значение приобрели разработка методов районирования территории по медико-демографическим, эпидемиологическим, санитарно-гигиеническим показателям и санитарным условиям водопользования населения.

Проведение этой работы в рамках ФЦП «Возрождение Волги» (совместные исследования ИВП РАН, Института паразитологии РАН и НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды РАМН) обусловило первоочередную ориентацию исследований на проблемы крупного речного бассейна [16].

Характер патогенетической направленности действия биологических и химических компонентов вод определил необходимость районирования территории по медико-демографическим показателям, показателям инфекционной и неинфекционной заболеваемости, имеющей прямые или вероятностные связи с микро- и/или макроэлементным (природным и антропогенным) химическим, микробным и паразитарным составом вод.

В основу медико-экологического районирования были положены принципы таксонизации территории: по характеру биологического действия загрязняющих и/или природных компонентов с учётом анализа риска для здоровья, воздействия на демографические показатели и показатели инфекционной, паразитарной и неинфекционной заболеваемости населения, изменения медико-демографических показателей, по степени изменения показателей заболеваемости населения, связанной с природным составом, химическим и биологическим загрязнением вод.

В связи с очевидными современными экономическими сложностями получения достаточно обоснованных эколого-эпидемиологических данных на крупных территориях России, было предложено использование методов оценки факторов риска для здоровья населения путём установления степени опасности и приемлемости для питьевого водопользования различных водоисточников на основе совместного использования двух официально принятых гигиенических классификаций: распределения вредных веществ по классам опасности и распределения водных объектов по характеру загрязнения. Такой подход не противоречил принятой на национальном и международном уровне методологии оценки качества вод. В тоже время, он позволял получать наиболее адекватные представления о степени экологической опасности водоисточника. Применительно к внедряемой в России системе регионального нормирования качества питьевой воды, такое предложение приобрело практическую значимость.

В составе этих исследований большой раздел работ был выполнен совместно с Институтом паразитологии РАН, имевшим большой опыт разработки методов районирования территории РФ в отношении природно-очаговых и паразитарных болезней и прогнозирования изменений обстановки по этим группам заболеваний на

фоне изменяющихся условий окружающей среды. Исследования проводились с учётом дальнейшего использования их основных положений при разработке методологии прогнозирования изменений паразитарной обстановки территорий речных бассейнов [4].

Разработка необходимых базовых медико-экологических критериев, характеризующих ситуацию по этим группам заболеваний, позволила определить специфику подходов к медико-экологическому районированию в отношении паразитозов. Также был про-веден анализ методов оценки информации, используемой при районировании, и выделены основные принципы районирования по показаниям статистики и «по предпосылкам». Наиболее важным здесь было определение методов, дающих наиболее ёмкую, обладающую прогностической ценностью информацию (кластерные анализы, метод квантования, информационно-аналитические методы, сочетанные картографические методы). Разработанная методология была апробирована при оценке паразитологической ситуации в двух Волжских регионах: Республике Калмыкии и Астраханской области. Это позволило дать рекомендации для достижения максимально эффективных результатов районирования по паразитарным и природно-очаговым болезням на территории всего Волжского бассейна [4].

Колебания уровня внутренних морей. Исследования медико-экологических аспектов этой проблемы первоначально были проведены в ИВП в связи с развившейся Аральской экологической катастрофой, а далее в связи с трансгрессией Каспийского моря. [9, 13, 30]. Участие в этих исследованиях 9 крупных центральных и региональных исследовательских институтов системы здравоохранения и Академии медицинских наук, обеспечило не только широкий внутримедицинский междисциплинарный подход, но и достаточно детальные разработки на каждом из этих дисциплинарных направлений [13].

Анализ динамики развития наблюдаемых видов патологий человека в Восточном Приаралье позволил установить прямые причинно-следственные связи высоких уровней инфекционной кишечной, паразитарной и неинфекционной заболеваемости (болезни почек, печени, крови, онкологические заболевания, генетические нарушения) со значительными микробными и химическими загрязнениями.

ми питьевой воды, выявил трёхфазность процесса динамики формирования заболеваемости: гиперэпидемическую, иммунодефицитную и отдаленную неинфекционную фазы [25].

Полученные данные рассматривались как прогностическая модель развития резко негативной медико-экологической ситуации в условиях сочетания процессов деградации качества вод суши и кризисных социально-экономических явлений. Впервые была рассмотрена динамика развития медико-экологической обстановки на орошающей территории аридной зоны, переживающей сложнейшую экологическую ситуацию. Резкое ухудшение качества среды обитания, условий жизни, питания, труда и отдыха местного населения в совокупности с крайне низкой базой профилактической и клинической медицины привело к росту заболеваемости и смертности людей до наивысшего уровня, зарегистрированного в стране в период 1980-х гг.

Материалы исследований позволили утверждать, что формирование негативно действующих факторов среды обитания человека в Приаралье непосредственно связано с процессами, определившими и возникновение Аральского экологического кризиса, дестабилизацию природной среды Аральского региона. Был разработан медико-экологический раздел концепции преодоления последствий Аральского экологического кризиса. Этот раздел также содержал обоснованную программу кратко-, средне- и долгосрочных мероприятий, ориентированных на медико-экологические приоритеты [13].

Итоги этих работ привлекли внимание международных и национальных зарубежных организаций. Впервые они были доложены в 1990 г. на международном симпозиуме «Аральский кризис – проблемы охраны окружающей среды в Центральной Азии» в Блумингтонском университете (США); на специальных слушаниях в ООН (Швейцария, Женева); на II конференции стран СНГ и США по гидрологическим и гидрогеологическим проблемам окружающей среды (США, Вашингтон). Они вошли в состав международного проекта ЮНЕП и были рассмотрены в ВОЗ с целью формирования специального проекта ЮНЕП/ВОЗ/СНГ. Результаты этих исследований были обобщены и в отдельной коллективной монографии институтов-соисполнителей [13] и рассмотрены в других научных публикациях.

Исследований медико-экологических аспектов проблемы трансгрессии Каспийского моря проведены творческим коллективом, созданным Научным советом РАН по проблеме Каспия в целях разработки концепции преодоления последствий повышения уровня моря. Он включал специалистов ИВП (головная организация), Института паразитологии РАН (ИП РАН), Центра демографии и экологии человека Института народно-хозяйственного прогнозирования РАН.

Материалы исследований медико-демографической ситуации, заболеваемости, санитарных условий жизни населения выявили выраженное неблагополучие санитарно-эпидемиологической обстановки в связи с изменениями гидрологических условий, деградацией качества водоисточников и резким осложнением социальной обстановки в зоне подтопления и затопления населенных мест сельскохозяйственных угодий и объектов народного хозяйства [9]. Были установлены высокие уровни кишечной и паразитарной заболеваемости населения, непосредственно связанной с водным фактором и доминирующими в общем спектре нозологических форм, особенно в прибрежных поселениях. Экспертный анализ причин неинфекционных заболеваний сердечно-сосудистой, нервной и выделительной систем, генетических нарушений и раковых заболеваний выделил доминирующее значение прямого и косвенного влияния водного фактора. По коэффициенту суммарной оценки состояния здоровья населения изученные территории России (Дагестан, Калмыкия, Архангельская область) были отнесены к числу весьма неблагополучных. В рамках проведённых исследований был разработан прогноз дальнейшего негативного развития медико-экологической ситуации в зоне влияния трансгрессии моря и рассмотрены возможные медико-экологические последствия использования различных вариантов гидротехнических защитных сооружений [30, 43].

На основе проведённых исследований был разработан медико-экологический раздел концепции преодоления кризисных явлений, связанных с повышением уровня моря, подготовленный Научным советом РАН по проблеме Каспия [30]. Итоги этих исследований были обсуждены на крупной Международной конференции по проблемам вредного воздействия вод (Лос-Анжелес, 1997).

Для развития фундаментальных научных исследований водных проблем, проведённые работы важны расширением представлений о формировании здоровья населения в условиях критически изменяющейся гидрологической обстановки. Были показаны явления, процессы и закономерности развития патологии человека в условиях катастрофически повышенной и пониженной обводнённости территории. Определены последовательность, временная этапность и фазовость развития инфекционной, паразитарной и неинфекционной патологии. Установлены причинно-следственные связи наблюдавшейся патологии с воздействием комплекса изменяющихся природных, антропогенных и социально-экологических факторов. Исследования, проведённые на крупномасштабных природных моделях влияния процессов изменения водности территории на медико-экологическую обстановку, показали, что речь здесь идёт о создании более благоприятных условий для реализации эпидемических процессов кишечных инфекций и паразитарных заболеваний, интенсификации воздействия токсического антропогенного загрязнения вод, развитии белково-витаминной недостаточности и снижении иммунной защиты организма, влиянии нарастающих стрессовых состояний, наконец, о воздействии всего комплекса негативных социальных явлений, связанных с активизацией процессов миграции населения – ухудшения условий проживания, изменения трудовой занятости, характера питания и т.п. [9, 13, 30].

Проведённые исследования позволили выявить причинно-следственные связи, особенности и закономерности формирования высоких уровней различных форм инфекционной и неинфекционной заболеваемости населения в условиях резко выраженного прямого и косвенного воздействия водного фактора в экстремальных условиях.

Идентичность последствий, ведущих к всё более резкой потере потенциалов жизнеобеспечения, как в случае повышения, так и в случае понижения водности территории, оказывается и причиной схожих негативных медико-экологических процессов, в целом характеризующихся снижением продолжительности жизни, ростом детской и взрослой смертности, нарастанием инфекционной (особенно кишечной), паразитарной и неинфекционной патологии, генетических нарушений.

Интерпретируя эти процессы применительно к условиям изменений гидрологической обстановки в зонах выраженного влияния процессов глобального потепления на планете приходится констатировать, что при упрочении представлений о необратимости и нарастании наблюдаемых уже сегодня явлений, возникает необходимость планирования крупномасштабных мероприятий для смягчения последствий развития новой климатической ситуации как на национальном, так и на международном уровне. Изложенные выше соображения подтверждают необходимость интенсивного развития медико-экологических исследований современных глобальных гидроклиматических изменений.

Глобальные гидроклиматические изменения. Крупномасштабные глобальные изменения природной среды в настоящее время становятся все более очевидными. Главным фактором этих изменений является прогрессирующее потепление климата, которое продолжается уже более 100 лет. Важнейшей задачей современных научных исследований является установление многолетней динамики глобальных гидроклиматических процессов, изменяющихся под воздействием природных и антропогенных факторов и особенностей развития увлажнения различных территорий [42].

Установлено, что большую роль в формировании водного режима играют периодические изменения в поступлении различных воздушных масс в результате развития разнообразных циркуляционных процессов атмосферы. Этим процессом и обусловлено становление более влажного климата в большей части Мира. Однако в субтропических районах северного полушария между 10-й и 30-й параллелями наблюдается снижение уровня атмосферных осадков. В районах, обычно подверженных засухам, засушливые периоды становятся более продолжительными и суровыми. Установлено, что общий объём воды в таких крупнейших бассейнах рек – Нигера, Сенегала, и озера Чад сократился на 40–60%.

Применительно к гидроклиматической составляющей этой проблемы, исследования её медико-экологических аспектов включают широкий спектр научных задач, связанных с изучением возможных влияний на здоровье населения изменений обводнённости территории. При этом речь идёт не только о катастрофических последствиях наводнений, торнадо, селевых потоках и т.п., с огромным разруш-

шительным потенциалом, приводящих к гибели людей, тяжёлому и масштабному травматизму, разрушению поселений. Медико-экологические последствия здесь очевидны и понятны. Мы же имеем в виду ситуации, связанные с постепенно накапливающимися изменениями обводнённости территории, приводящими к критическим последствиям.

Принципиальная и согласованная позиция Всемирной организации здравоохранения Программы ООН по окружающей среде и Всемирной метеорологической организации, сформулированная на Всемирной конференции по изменению климата в 2003 г., опирается на результаты целого ряда научных публикаций. Она отражает преобладающую точку зрения о негативном влиянии глобальных изменений климата на здоровье населения. [42].

На настоящем этапе изучения этой части общей проблемы нами использованы материалы изложенных выше специальных исследований крупномасштабных экологических кризисов с водным пусковым механизмом – Каспийского и Аральского, испытавших выраженное влияние повышения или понижения обводнённости территории. Наблюдавшиеся здесь процессы и явления, по нашему мнению, могут приниматься в качестве аналоговых природных моделей развития таких ситуаций в условиях глобальных гидроклиматических изменений.

Углублённый анализ этих материалов позволил обосновать ряд прогностических построений [39]. Так, варианты, возникающие в связи с повышением водности территории, прежде всего, будут зависеть от её ландшафта и интенсивности процессов подтопления и затопления. Очевидно, рассмотрение изменений медико-экологической обстановки имеет смысл применительно к периоду, когда сохраняется возможность существования поселений, хотя и в новых условиях среды обитания. При этом резкое повышение водности территории будет способствовать окружению сохраняющихся населенных мест застойными водоёмами, не пригодными для питьевого и бытового использования. Качество поверхностных водоисточников деградирует в связи со смывом с поверхности вредных веществ, бактериальных и паразитарных загрязнений. Усугубление этих процессов будет связано с затоплением децентрализованных канализационных сооружений, а на морских побережьях – в результате сме-

шения морских и речных вод. Особое значение для микробного и паразитарного загрязнения вод приобретет затопление скотомогильников, септиков, мест содержания и выпаса скота. Деградация качества подземных водоисточников будет связана с их гидравлическими связями с загрязненными поверхностными водами. Повышение уровня стояния грунтовых вод повлечёт за собой ухудшение микроклимата жилищ и ускорение разрушений жилого фонда. Можно прогнозировать расширение ареалов обитания тяготеющих к воде переносчиков и возбудителей паразитарных заболеваний, повышение их численности на сохраняющихся участках суши. За счёт нарушения транспортных коммуникаций и очевидного сокращения сельскохозяйственных угодий, снабжения продуктами ухудшаются условия и характер питания населения изолированных поселений. Изменение характера трудовой занятости населения, повлечёт за собой изменения его социально-психологического статуса и рост профпатологии.

Опираясь на результаты ранее упомянутых исследований [33], был предложен сценарий возможного влияния изменения гидрологической обстановки на медико-экологическую ситуацию в условиях глобальных гидроклиматических изменений [40]. Такие изменения среды обитания человека позволили прогнозировать очевидное ухудшение санитарно-эпидемиологической обстановки, вызываемое загрязнением вод и интенсификацией водного пути передачи инфекционных, паразитарных, природно-очаговых и особо опасных инфекций, что ведёт к нарастанию уровней инфекционной и паразитарной заболеваемости. В связи со снижением иммунологического статуса, особенно детского населения, вследствие нарастания белково-витаминного дефицита, (связанного с неполноценным питанием), а также в результате расширения зон паразитарной поражённости, можно прогнозировать интенсификацию роста инфекционной и неинфекционной заболеваемости, поскольку речь идёт о снижении иммунитета и адаптационных способностей организма. Можно предположить существенное нарастание числа случаев аллергических, кожных, желудочно-кишечных, сердечно-сосудистых, эндокринных заболеваний, снижения иммунитета, особенно среди наиболее раннего детского контингента. Несомненно и воздействие всего комплекса негативных социальных явлений, связан-

ных с активизацией процессов миграции населения (ухудшения условий проживания, изменения трудовой занятости, характера питания). В целом это создаст дополнительные предпосылки для распространения инфекционных заболеваний, прежде всего кишечных, на территориях вне зоны затопления или подтопления за счёт инфицированных переселенцев.

Целевая направленность оздоровительных мероприятий должна обеспечить снижение отрицательных для жизнеобеспечения последствий затопления и подтопления территорий – сокращения или исчезновения селитебных зон, ухудшения условий проживания в связи с повышением уровня стояния грунтовых вод, биологического и химического загрязнения водноземельных ресурсов, деградации водоисточников, сокращения полезных сельскохозяйственных угодий и числа народнохозяйственных объектов, нарушения транспортных коммуникаций, снижений уровня пищевой обеспеченности, существенных осложнений деятельности профилактических и лечебных служб здравоохранения. Реализация этих мероприятий может рассматриваться применительно к планируемым вариантам защиты морского побережья от затопления, подтопления и нагонных явлений. Предварительный экспертный прогноз медико-экологических последствий варианта без мер берегозащиты и варианта с частичной защитой побережья в местах расположения важных народнохозяйственных объектов и крупных сложившихся поселений, свидетельствует о сравнительной идентичности негативных последствий по характеру влияния на санитарные условия жизни и состоянию здоровья населения. В обоих случаях возникает необходимость переселения населения (в первом случае всего, а во втором – его части), что требует проведения широкого комплекса мероприятий для его жизнеобеспечения и предотвращения ухудшения санитарно-эпидемиологической обстановки в новых или расширяющихся существующих поселениях. При варианте с частичной берегозащитой появление островных или полуостровных поселений сопровождается ухудшением условий жизнеобеспечения и санитарно-эпидемиологической обстановки. Выбор того или иного варианта мероприятий по защите побережья зависит от соображений народнохозяйственной и экономической целесообразности и должен базироваться на прогнозе изменений гидроло-

тической обстановки. Существует и III вариант – создание берегозащитных сооружений длительной протяженности, охватывающий всё побережье, где прогнозируются подтопления и затопления. Очевидно это наиболее привлекательный, но экономически крайне дорогостоящий вариант. Тем не менее, он уже применяется в некоторых странах, где уже ощутимы последствия повышения уровня морских вод.

Изменения медико-экологической обстановки в связи с понижением водности территории – дегидратацией, аридизацией и опустыниванием – в зонах влияния глобальных трансформаций климата также можно было прогнозировать в общем виде. При этом доминирующим становится прямое и косвенное воздействие водного фактора на качество среды обитания человека со всеми вытекающими отсюда последствиями для здоровья населения. Очевидная для этих условий деградация количества и качества вод суши, в том числе используемых для коммунально-бытовых целей, позволяет прогнозировать нарастание их биологического и химического загрязнения. Исчезновение полноценных водоисточников вызовет необходимость использования случайных загрязнённых водных объектов. Если это водные артерии с сокращающимся в силу аридизации территории стоком, то при сохранении количества и состава, сбрасываемых в них сточных вод различного генезиса, функции разведения и самоочищения сначала снижаются, а затем и вообще исчезнут. Однако даже при снижении объёма сточных вод сохранение ранее накопившихся в донных осадках загрязняющих веществ может повлечь за собой вторичное загрязнение речных водотоков.

Для орошаемых сельскохозяйственных территорий с интенсивным применением пестицидов сброс коллекторно-дренажных вод в условиях нарастающей аридизации окажется крайне неблагоприятным фактором загрязнения природных водных объектов и засоления вод. Количественная и качественная деградация речного стока неминуемо отразится на состоянии водных объектов – реципиентов. Правомерно ожидать снижения их водности, нарастания солёности, существенных изменений внутриводоёмных экосистем. Рыбопромысловое значение таких водоёмов окажется существенно сниженным или вообще потерянным.

В условиях выраженного понижения водности территории также следует ожидать неблагоприятные изменения уровня здоровья населения в связи с деградацией качества среды обитания человека, её водного, атмосферного и почвенного компонентов. Опасными для здоровья населения станут биологическое (микробное, паразитарное) и химическое загрязнение водоисточников, атмосферного воздуха (пыле-солевые воздействия), снижение качества и количества продуктов питания, в том числе витаминов, незаменимых белков и т.п. Характер этой заболеваемости будет зависеть от состава приоритетных для данной территории загрязняющих веществ, что в свою очередь связано с особенностями её промышленного и сельскохозяйственного освоения. Снижение водности территории будет менять и её паразитарный профиль, повышая значение влагонезависимых переносчиков паразитарных заболеваний, с одной стороны, и вызывая миграцию влаголюбивых животных-переносчиков, расширяя ареалы некоторых природно-очаговых и особо опасных болезней (например, туляремии, чумы) – с другой.

Патогенетическое (болезнетворное) значение выделенных выше факторов будут усиливать неблагоприятные трансформации социальной сферы: изменения трудовой занятости, сокращение местного производства продуктов питания, усиление миграционных процессов и др. Т.о, исследования констатировали, что при необратимости и нарастании наблюдаемых уже сегодня глобальных гидроклиматических изменений, возникает необходимость крупномасштабных мероприятий для смягчения последствий развития новой климатической ситуации, как на национальном, так и на международном уровне. Очевидна необходимость их ориентации на минимизацию влияния антропогенных причин климатических трансформаций и на развитие целенаправленных медико-профилактических мероприятий, ориентированных на защиту населения от воздействия негативных изменений факторов среды обитания человека.

К исследованию этой проблемы также относятся новые исследования ИВП, связанные с риском глобальной вирусной инвазии в связи деградацией криолитозоны в условиях нарастающего потепления климата. Результаты первого периода исследований этой проблемы уже приняты в периодическую научную печать для пуб-

ликации в 2017 г. Дзюба А.В., Эльпинер Л.И. Деградация криолитозоны и риск глобальной вирусной инвазии (в журнал «Вода – химия и экология»); Эльпинер Л.И., Дзюба А.В. Медико-экологические аспекты деградации зоны многолетней мерзлоты: проблема палеовирусной контаминации (в журнал «Гигиена и санитария»).

Для смягчения медико-экологических последствий климатических изменений настоятельно требуется прогностическое обеспечение управлеченческих решений в области рационального использования и охраны водных ресурсов, позволяющее учитывать интересы охраны здоровья населения в связи с антропогенными и природными изменениями гидрологической и гидрогеологической обстановки в новых климатических условиях. Оно может быть реализовано на базе целевой комплексной программы исследований, в выполнении которой необходимо участие институтов РАН, МП крупным Р, Минсоцразвития РФ, Госкомгидромета РФ и других министерств и ведомств, связанных с природопользованием. Содержание такой программы должно обязательно включать медико-экологические исследования проблемы использования подземных вод.

Подземные воды. В ситуации, когда деградация качества поверхностных вод, связанная с мощным антропогенным прессом, приобретает всё большее значение, особое внимание уделяется подземным водам, в целом ряде случаев сохраняющим высокие показатели качества. Медико-экологические аспекты проблемы использования подземных вод в настоящее время, в основном, связаны с обеспечением полноценного и безопасного для здоровья населения хозяйствственно-питьевого водопользования. Для решения комплекса всех возникших на рассматриваемом направлении задач был необходим междисциплинарный подход, предусматривающий комплексное использование методов гидрографии, гидрохимии, геоэкологии и профилактической медицины. Направленность такого подхода на получение целевой информации для оценки и прогнозирования влияния качества подземных вод на здоровье населения должна была обеспечить выбор экологически безопасных подземных водоисточников. Поэтому развитие полноценного медико-экологического направления исследований гидрогеологической ориентации оказалось тесно связанным с использованием современных гигиенических, экологических, социально-демографических и меди-

ко-географических подходов. Базирование исследований медицинского профиля на полноценную гидрогоеохимическую информацию, требовало достаточную взаимную осведомлённость специалистов об исходных предпосылках намечаемых совместных работ [38].

Проведённый анализ интенсивно накапливающейся отечественной и зарубежной гидрогоеологической информации, свидетельствовал о существенных изменениях представлений о безопасности подземных вод для здоровья населения, особенно на тех территориях, где в силу различных обстоятельств нарушаются природные условия формирования и сохранения их качества. Формирующийся банк медико-экологических данных всё с большей очевидностью демонстрировал причинно-следственные связи инфекционной и неинфекционной заболеваемости населения с ухудшением качества воды подземных питьевых водоисточников [34]. Наряду с оценкой роли антропогенных загрязнений подземных вод, значение приобретало определение значимости их природного химического состава, как макро-, так и микроэлементного. В сложившейся новой ситуации возникла необходимость совершенствования научных основ оценки качества и охраны подземных вод [34, 45].

В гидрогоеологии сформировалась новая проблема, требующая развития фундаментальных и научно-практических исследований с целью определения эффективных мер безопасного для здоровья населения использования подземных вод в условиях интенсивного техногенеза [28, 45].

Анализ информации, накопленной контролирующими службами, заставлял по-новому рассматривать и природные компоненты состава подземных вод. Прежде всего, их повышенную минерализацию. Например, подземных вод юга России, Поволжья, где величина общего солесодержания в ряде случаев достигает 8000–10000 мг/л. Научные источники свидетельствовали о причинно-следственных связях сердечно-сосудистой патологии с содержанием в разных соотношениях Ca и Mg, о протекторной роли этих элементов (при умеренных их количествах) по отношению к некоторым токсичным микроэлементам, например Cd. Появились и эколого-токсикологические исследования, определившие причинно-следственные связи патологии беременности и родов с использованием для питья подземных вод повышенной до 2,5–3,5 мг/л минерализацией [34].

В связи с достаточно широким распространением подземных вод повышенной минерализации и необходимости применения орошения для их использования в питьевых целях, возникла необходимость рассмотрения медико-экологических аспектов этой, казалось бы, только технической проблемы. Результаты значительно ранее проведённых исследований уже в то время послужили основанием для выдвижения пионерной гипотезы о физиологической роли солевого состава питьевой воды [20]. Именно в этой связи впервые были сформулированы основные принципиальные представления об оптимальном солевом составе питьевой воды, включающие, кроме требований безвредности её химического состава, критерии обеспечения оптимальных функциональных реакций организма с учётом процессов, протекающих на уровне клетки, отдельного органа или систем организма в целом. Анализ данных о физиологической полноценности питьевой воды позволил сформулировать требования к кондиционированию орошённой воды, с учётом приемлемого диапазона её солевого состава, гидрохимического класса, соотношения макро- и микроэлементов [1].

Переход от современных подходов, ограничивающих лишь верхние, предельно допустимые концентрации тех или иных веществ в питьевой воде по органолептическим и токсикологическим признакам вредности, к оптимизационному подходу, оценивающему физиологическую (точнее, биологическую) полноценность воды, несомненно, отражает наиболее прогрессивные тенденции развития учения о питьевых водах. До последнего времени такой подход касался лишь установления оптимального уровня содержания в питьевой воде фтора.

Разработка научных основ и методов комплексных гидрогеоэкологических и медико-экологических оценок условий использования подземных вод в зонах их техногенного загрязнения и проявления природных аномалий химического состава была проведена ИВП и Геоцентром «Москва». На основе изучения гидродинамических, гидрогеохимических и гидрогеологических особенностей формирования качества подземных вод Московского региона, используемых для питьевых целей, выявлены зоны распространения подземных вод с повышенным содержанием вредных веществ природного и антропогенного генезиса ( $\text{Sr}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Fe}$ , соли жесткости). Была обос-

нована необходимость разработки новой методологии комплексного гидроэкологического и медико-экологического подхода к оценке использования подземных вод для питьевых целей в условиях интенсивного техногенеза [28].

В рамках предложенной методологии были разработаны методики интегральных медико-экологических оценок и прогнозов, включающие гидрогеоэкологическое и медико-экологическое изучение качества воды на водозаборах подземных вод и моделирование гидрогоемиграционных процессов. Были предложены позиции мониторинга здоровья населения в связи с использованием существующих и новых подземных водоисточников в зонах их техногенного загрязнения и проявления природных аномалий химического состава. Обоснованы подходы к установлению приоритетных показателей, определены особенности формирования качества подземных вод на промышленно освоенных урбанизированных территориях, характер его изменений при современной системе смешения и обеззараживания вод различных горизонтов [11].

В качестве основного подхода предложено комплексное медико-экологическое и гидрогеоэкологическое районирование территории. Целью его является установление (выделение) природных таксонов, в пределах которых существует опасность антропогенного загрязнения подземных вод или проявления природных аномалий их состава, ранжирование их по относительной мере такой опасности.

Предложенные подходы к такому районированию предусматривали создание комплекса карт, отражающих обусловленные позиции таксонизации территории. Масштаб и структура карт должны быть идентичны картам гидрогеоэкологического районирования, что обеспечивает возможности получения совместимых данных. Так как медико-демографические данные, чаще всего, даются по административным единицам, границы таксонов должны отражать административное районное деление. Для использования имеющейся картографической информации и для её более полного анализа разработаны методы адаптации географических информационных систем (ГИС) к комплексному медико-экологическому и гидрогеоэкологическому районированию территорий по критериям опасности загрязнения подземных вод. При этом отмечена необходимость анализа массивов имеющейся медико-демографической,

географической, гидрогеологической информации для обнаружения взаимосвязей [16,35].

Предложенный подход был апробирован в Московском регионе, применительно к оценке опасности загрязнения подземных вод высокотоксичным антропогенным загрязнением – диоксинами. Обоснованы виды и источники необходимой информации и способы её анализа. При этом обобщена и систематизирована информация о диоксиногенных источниках загрязнения подземных вод и проведено картографирование их размещения в пределах региона. Даны оценка возможности миграции диоксинов в водоемещающей толще горных пород и зоне аэрации. Обобщены и систематизированы данные об эксплуатации водоносных горизонтов, использующихся в целях хозяйствственно-питьевого водоснабжения, размещения водозаборов и месторождений подземных вод. Проведён анализ размещения водозаборов относительно источников диоксиногенных загрязнений. Разработаны методы предварительной оценки загрязнения подземных вод этими высокотоксичными канцерогенными соединениями по данным содержания в водном растворе органических веществ, являющихся курьерами диоксинов. Апробированы способы моделирования гидрогеологической обстановки с целью установления вероятного времени транспортировки диоксинов в водоносные горизонты с учётом периода полураспада этих веществ водной среде [11, 28].

С оценкой роли природных микроэлементов подземных питьевых вод были связаны и медико-экологические исследования ИВП в Смоленской области [35]. Ранжирование административных районов области по показателям качества подземных вод (1012 скважин) в сопоставлении с современными данными о влиянии отдельных их компонентов природного происхождения на здоровье человека, позволило сформулировать гипотезу о большой степени вероятности зависимости заболеваемости местного населения от присутствия в воде повышенных концентраций железа, солей жёсткости, марганца и стронция стабильного. Установлены статистически значимые связи между переломами конечностей у детей и повышенным содержанием стронция стабильного в воде, а также между повышенной жёсткостью и болезнями мочеполовой системы. По существу, была обоснована система определения целевых террито-

рий для проведения дальнейших о этапов эколого-эпидемиологических исследований в этом направлении, что является первым этапом работ по оценке риска влияния водного фактора («идентификация опасности»).

Материалы исследований медико-экологических аспектов использования подземных вод отражены в ряде научных публикаций в т.ч. в 2-х, изданных за рубежом, и 4-х – в РФ [7, 45 и др.].

Новая экологическая ситуация требовала и новых подходов к оценке качества подземных вод, и к формированию более интенсивной деятельности по их охране, обеспечению безопасного водопользования. Дальнейшие, более широкие перспективы развития фундаментальных медико-экологических исследований водных проблем были связаны с углублением и расширением современного учения о влиянии гидрологической обстановки на состояние здоровья и условия жизни населения в усугубляющейся экологической ситуации. В этой связи проявлена инициатива выделения самостоятельного междисциплинарного научно-дисциплинарного раздела науки о подземных водах – медицинской гидрогеологии. [37, 38].

Питьевая вода. Кризис питьевого водоснабжения. Медико-экологические исследования проблемы питьевого водоснабжения в ИВП изначально были связаны с «Десятилетием питьевой воды и санитарии» провозглашенным XXXY сессией Генеральной Ассамблеи ООН на период 1980-х гг. Глобальные масштабы этой проблемы в полной мере обозначились уже в 1977 на конференции ООН по водным ресурсам. Её материалы свидетельствовали о количественном и качественном дефиците питьевой воды, росте и масштабах заболеваемости населения, связанной с негативным влиянием водного фактора во многих странах мира. ООН призывала национальные и международные организации обратить самое серьёзное внимание на эту проблему, принять необходимые меры для её решения.

Результаты широкого круга целенаправленных научных исследований, проведённые с тех пор во многих странах мира, позволяют говорить о сформировавшейся сегодня глобальной проблеме качественного, а в ряде случаев количественного дефицита воды, отражающимся на состоянии здоровья населения в связи с использованием некондиционных питьевых вод поверхностных и подземных водоисточников. Острая необходимость решения задач полноцен-

ного и безопасного водоснабжения населения, как важнейших и первостепенных, подчеркивается положениями целого ряда крупных международных документов. Серьёзность ситуации заставила Генеральную Ассамблею ООН объявить 2005–15 гг. Международным десятилетием действий «Вода для жизни».

Для РФ это острая проблема, заслуживающая специального, отдельного рассмотрения. В последние годы речь идёт о кризисе питьевого водоснабжения, связанном с комплексом обозначившихся законодательно-правовых, экономических, экологических и технологических проблем. В сложившихся кризисных условиях функционирования водохозяйственной отрасли доминирующий характер приобретает необходимость определения мероприятий направленных на обеспечение полноценного и безопасного питьевого водоснабжения в городах и населённых пунктах.

Современные данные о качестве питьевой воды определяют их высокую значимость при определении путей преодоления сложившейся в стране демографической ситуации [36] По официальным данным, хуже чем в РФ показатели смертности только в Афганистане, Нигерии, Сомали и на Украине. В структуре причин смертности населения РФ первые два места занимают заболевания сердечно-сосудистой системы и новообразования. О негативной роли питьевой воды здесь свидетельствуют результаты эколого-эпидемиологических исследований, проведенных и за рубежом, и в нашей стране. Также, по официальным данным, связь повышенной заболеваемости раком с наличием в питьевой воде канцерогенов установлена и в ряде населённых пунктов РФ [15]. Показано, что и фиксируемая повышенная сердечно-сосудистая заболеваемость связана с особенностями микро- и макроэлементного состава питьевых вод. На основе анализа данных 50-летнего периода наблюдений, выполненных в ряде стран, эксперты Европейского Центра Окружающей среды и Здоровья (Рим, 2003) признали, что гипотеза о связи потребления жёсткой воды с частотой сердечно-сосудистых заболеваний верна, а важнейшей полезной составляющей следует считать магний. Отечественные и зарубежные эколого-токсикологические и эколого-эпидемиологические исследования также свидетельствуют о способности химических органических и неорганических антропогенных загрязнений питьевых вод вызывать заболевания выделительной,

пищеварительной, костно-мышечной, нервной, иммунной систем, опорно-двигательного аппарата, вызывать аллергии, дефекты развития, заболевания наследственной природы [47]. Кроме того, необходимо было учитывать, что в питьевой воде ряда населённых мест обнаруживались антропогенные загрязняющие вещества, вызывающие сердечно-сосудистую патологию [15].

В проблеме качества питьевой воды ещё недостаточно оценена значимость функционального состояния экосистем воды и суши в формировании патогенных проявлений водного фактора.

Изучение этого вопроса показало, что сведения о водном факто-ре возникновения неинфекционных заболеваний сейчас пополняют новые отечественные и зарубежные исследования. Они, свидетельствуют о том, что такой гидробиологический процесс, как евтрофи-рование («цветение») водоёмов, вызванное интенсивным развитием ряда водорослей, главным образом сине-зелёных, сопровождается выделением в воду ряда токсичных органических соединений, спо-собных накапливаться в воде и в гидробионтах и вызывать при её употреблении болезнетворные эффекты [22, 44]. Эти данные углубля-ют представления о недоброкачественности вод евтрофированных водоёмов. Ранее они ограничивались сведениями об их низких орга-нолептических свойствах (запахах), проявляющихся при обработке воды на водопроводных станциях. Напомним, что пусковые меха-низмы евтрофикации вод связаны с избыточным поступлением биогенных элементов (азота и фосфора), имеющим антропогенный генезис.

Сведения о токсичности воды евтрофных водоёмов придают осо-бое значение гидробиологическим прогнозам этих процессов, открывая пути их новой, медико-экологической интерпретации. Учёт этого обстоятельства при рассмотрении, например, гидротех-нических управлеченческих решений приобретает новое значение. Нельзя не подчеркнуть, что доказательства причинно-следственных связей неинфекционной заболеваемости населения с водным фак-тором, требуют проведения методически весьма трудоёмких и сложных исследований, участия высококвалифицированных специ-алистов и серьёзного финансирования. Очевидно, именно с этим связан ограниченный территориальный диапазон таких работ на территории России. Однако это никак не оправдывает их недоста-

точную развитость, зависящую от степени осознания проблемы на государственном уровне.

Разделы настоящей статьи свидетельствуют о том, что медико-экологические аспекты питьевого водоснабжения постоянно доминировали во всех исследованиях, связанных с изучением влияния гидрологической и гидрогеологической обстановки на здоровье населения.

Однако, первым этапом медико-экологических исследований в области питьевого водоснабжения, проведённых в 1980-х гг., явился анализ передового опыта решения возникающих здесь задач на примере одной из индустриально развитых стран, в частности США. Проведение этой работы совместно с Институтом США и Канады АН СССР позволило рассмотреть комплекс водно-ресурсных, нормативно-правовых, медико-биологических, экологических, организационных, социальных, технико-экономических, и политических аспектов проблемы питьевого водоснабжения населения. Результаты этой работы отражены в вышедшей в 1983 г. монографии «Проблемы питьевого водоснабжения в США» [21]. Её выводы свидетельствовали о наличии целого ряда общих для обеих стран задач, связанных с решением проблемы питьевого водоснабжения. К ним были отнесены количественное и качественное истощение водоисточников в ряде регионов, нарастание безвозвратного водопотребления в связи с развитием систем оборотного водоснабжения, необходимость совершенствования стандартов качества природной и питьевой воды, экономические трудности их реализации. Исследования показали, что перенос центра тяжести решения проблемы в область медико-экологических аспектов, выделение приоритетов охраны здоровья населения при определении параметров устанавливаемых стандартов и принятии законодательных решений оказывается наиболее результативным. Была показана слабость корректировки нормативов качества питьевой воды экономическими соображениями, как это было принято в США и до сих пор является предметом устремлений некоторых наших чиновников.

В тоже время, стала очевидной необходимость формирования общих подходов к решению проблемы питьевого водоснабжения с учётом специфики сложившейся в нашей стране экологической и

экономической обстановки. В этом направлении и были ориентированы дальнейшие исследования по данной проблеме [36].

В сложившихся кризисных условиях функционирования водохозяйственной отрасли доминирующий характер приобретала необходимость обоснования мероприятий, направленных на обеспечение полноценного и безопасного питьевого водоснабжения в городах и населённых пунктах. К числу неотложных мер было отнесено совершенствование нормативной базы, определяющей качество питьевой воды и совершенствование водоохраных мероприятий. Возникла необходимость преодоления устаревших и уже неадекватных подходов к формированию системы контролируемых показателей на основе единого учёта региональных особенностей качества вод, гигиенических критерии выбора приоритетных показателей и эффективных технологических решений.

Скоординированные исследования ИВП, ИП РАН, Центра медицинской демографии Института системного программирования РАН, Геоцентра «Москва», НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды РАМН, ВНИИ ВОДГЕО позволили исследовать проблему питьевого водоснабжения, поэтапно решая упомянутые выше задачи.

Проведенные методологические разработки, прежде всего, были посвящены исследованию системы «качество вод суши – питьевая вода – здоровье населения» [41]. Обобщение и анализ данных о закономерностях формирования качества воды водоисточников в условиях развивающейся деградации качества поверхностных и подземных водных потоков открывали возможности картографических построений, отражающих пространственно-временные особенности качества воды водоисточников по степени опасности и интенсивности антропогенных и природных включений, используя медико-экологические критерии. Привлечение и обобщение данных о качестве питьевой воды, используемой населением, с учётом эффективности барьерной роли кондиционирующих сооружений, современной технологической, нормативной и контрольно-аналитической базы расширяло эти представления, позволяя оценить степень эффективности существующей системы водоохраны и водоподготовки.

Результаты анализа фондовых данных контрольно-аналитических служб и материалов научных исследований, свидетельствовали

о непригодности большинства водных объектов РФ для всех видов водопользования населения по характеру и интенсивности антропогенного загрязнения. Изучение региональных особенностей формирования качества воды поверхностных и подземных питьевых водоисточников РФ и питьевой воды, используемой населением, позволило оценить степень опасности и интенсивность загрязнения питьевой воды и учесть значительные масштабы использования её в некондиционном виде. При этом были учтены закономерности деградации качества вод суши в зависимости от интенсивности и характера антропогенного пресса в зонах формирования качества. Официальные данные и материалы научных исследований свидетельствовали о прямом и косвенном влиянии качества питьевой воды на характер и уровень инфекционной, неинфекционной и паразитарной заболеваемости населения РФ на основе эпидемиологически доказанных ситуаций [15].

Существенным разделом проведённых исследований питьевого водоснабжения явились разработки, обосновывающие необходимость использования регионального нормирования качества питьевых вод. Для этой цели были обобщены и проанализированы современные медико-статистические материалы и данные специальных научных исследований, устанавливающие причинно-следственные связи ряда инфекционных кишечных, неинфекционных, в т.ч. сердечно-сосудистых, онкологических и других заболеваний с качеством питьевой воды, различно выраженные в разных регионах. Предложенный региональный подход к нормированию качества питьевой воды нашёл отражение в СанПиН 2.1.4.559-96 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» и в проекте Федерального Закона – технического регламента «О безопасности питьевой воды», подготовленного ведущими специалистами НИИ Экологии человека и гигиены окружающей среды РАМН. Практическая реализация положений этого закона требует и новых подходов к оценке качества питьевых водоисточников, как подземных, так и поверхностных, и к формированию более интенсивной деятельности по их охране, обеспечению безопасного водопользования. Приципиально новым здесь является не только существенное расширение круга нормируемых показателей, но и открывающиеся воз-

можности построения региональных нормативных документов. Последнее связано с введением т.н. «рабочих программ производственного контроля качества воды» на основе установления нормируемых показателей применительно к местной ситуации. Практическая деятельность в этом направлении здесь также должна опираться на районирование территории по степени опасности и интенсивности антропогенных загрязнений поверхностных и подземных источников питьевой воды, а так же по характеру и уровню заболеваемости связанный с водным фактором. Т.о. вышеизложенная методология медико-экологического районирования приобретала здесь ключевое значение. Предложенный подход позволял определить характер и очередность необходимых на различных территориях мероприятий и капиталовложений, что особенно существенно в сложных экономических условиях. Непосредственное отношение к этим работам имеют изложенные выше исследования, связанные с использованием подземных вод.

В целом, разработанная стратегия преодоления сложившейся гидрогеологической обстановки, базировалась на обеспечении приоритетов здоровья населения и экосистемном подходе при решении управлеченческих водохозяйственных задач. Проблема питьевого водоснабжения здесь занимает приоритетные позиции. Особого внимания требовало изучение особенностей формирования качества питьевой воды в условиях интенсивного техногенеза на региональном и субрегиональном уровне.

Междисциплинарный характер этой проблемы определял необходимость дальнейшего развития совместных медико-экологических, гидрологических, гидрогеологических и технико-экономических подходов к созданию безопасных условий питьевого водоснабжения населения в соответствии с новыми российскими нормативными документами. Требуется и дальнейшее совершенствование методов установления причинно-следственных связей состояния здоровья населения с водным фактором. Возникающие при этом исследовательские задачи связаны с созданием единой методологии и унифицированных методов экологической эпидемиологии и экологической токсикологии. Решение этой задачи в настоящее время решается методами оценки риска для здоровья населения при воздействии веществ, загрязняющих окружающую среду [18].

Необходимость дальнейшего развития этих работ продиктована и интересами совершенствования системы управления водными ресурсами.

Управление водными ресурсами предусматривает использование активных приёмов изменения гидрологической обстановки (режимов, качества и количества вод) в интересах улучшения экологических и социальных условий жизни населения, полноценного функционирования всех отраслей хозяйства. При этом решается широкий диапазон задач, связанных с водообеспечением промышленных, коммунальных, рекреационных, сельскохозяйственных, транспортных, энергетических, природно-заповедных и других объектов и территорий [10]. По существу, решаются задачи распределения и охраны водных ресурсов с учётом приоритетов тех или иных интересов в конкретных территориальных условиях с использованием гидротехнических и/или регламентирующих приемов. Эти задачи неизбежно приобретают комплексный характер и требуют рассмотрения на основе системного подхода. В полной мере это относится и к такой общегосударственной проблеме как охрана здоровья населения [15, 26]. Применительно к управлению водными ресурсами речь идет об использовании активных приёмов изменения гидрологической обстановки (режимов, качества и количества вод) в интересах улучшения экологических и социальных условий жизни населения, его здоровья, полноценного функционирования всех отраслей хозяйства.

Для обеспечения эффективных управленческих водохозяйственных решений, соподчинённых приоритетам охраны здоровья населения, необходимо получение достаточно надёжных данных, характеризующих медико-экологическую ситуацию, связанную с гидрологическими или гидрогеологическими условиями водопользования. Без прогнозов её изменения во времени и пространстве правильный выбор таких решений маловероятен. Эти исследования должны обеспечивать надёжные основы для выбора безопасных водоисточников и (или) совершенствования охраны вод и технологий водоподготовки, а также безопасных зон водных рекреаций.

Изучение проблемы управления водными ресурсами позволило разработать концепцию, обосновывающую необходимость учёта интересов охраны здоровья населения при формированием управ-

ленческих решений в области рационального использования и охраны водных ресурсов [33]. Проведённые исследования показали, что задачи, возникающие в связи с формированием того или иного водохозяйственного управлеченческого решения могут быть эффективно решены лишь при условии применения медико-экологического междисциплинарного подхода, объединяющего природоведческие и медицинские дисциплины. Практически это означало базирование оценочных и прогностических медико-экологических построений на аналогичных проработках смежных дисциплинарных направлений – гидрогеологическом, геологическом, технико-технологическом, социально-экономическом. На практике это связано с обеспечением научных исследований медико-экологических последствий принятия того или иного варианта. Иными словами – обеспечивать эффективные управлеченческие водохозяйственные решения, соподчинённые приоритетам охраны здоровья населения. Для реализации этой позиции был предложен алгоритм построения обосновывающих медико-экологических исследований [33], базирующийся на принципах ранее разработанного междисциплинарного медико-экологического подхода.

Управление трансграничными водными объектами. Проблема рационального и безопасного использования трансграничных водных ресурсов не нова для современной цивилизации. Попытки юридического оформления общего пользования международных рек предпринимались начиная с 19 в. Ещё в 1815 г. странами бассейна Рейна было заключено первое соглашение о судоходстве. К середине 1990-х гг. в Европе и Северной Америке действовало около 150 двух- и многосторонних соглашений об использовании и охране трансграничных водотоков. Однако, речь в них шла, в основном, о навигации, а иногда о производстве электроэнергии.

Насущная необходимость учёта интересов природопользования в бассейнах рек, обострение проблемы загрязнения воды в международных реках и деградация их экосистем предопределили необходимость создания или укрепления международно-правовой и институциональной базы, способной обеспечить противодействие экологической угрозе. Сейчас организационно оформленное сотрудничество существует во многих больших международных бассейнах, и касается двух или более стран. Речь уже идёт о предуп-

реждении загрязнения, сохранении водности водотоков, т.е. об обеспечении экологической безопасности [10].

В настоящее время в мире насчитывается 245 речных бассейнов, используемых на территориях двух или нескольких государств. В их границах проживает 40% населения мира. В Европе опыт сотрудничества путём заключения соглашений и создания международных органов накоплен в бассейнах рек Дуная и Рейна, Мааса (Франция, Бельгия, Нидерланды), Мозеля (Бельгия, Франция, Люксембург), Саар (Франция, ФРГ). На других континентах примерами сотрудничества могут быть бассейны рек Меконга, Ганга, Нила, Св. Лаврентия, Колорадо и других.

Важным здесь является осознание на международном уровне бассейнового принципа регулирования природопользования, охраны и воспроизведения природно-ресурсного потенциала, предусматривающего эффективность этой деятельности в пределах всей речной системы. Общие принципы сотрудничества и координации действий стран в обозначенной области заложены в «Конвенции Европейской Экономической Комиссии ООН об охране и использовании трансграничных водотоков и международных озёр» (1992 г.); в Конвенции о праве несудоходных видов использования международных водотоков (1997 г.); в Рамочной Директиве Совета ЕС по Воде (2000 г.); в Лондонском протоколе «Вода и здоровье» к Конвенции ЕЭК ООН «Об охране и использовании трансграничных водотоков и международных озер» (1997 г.). Для учёта интересов охраны здоровья населения все перечисленные документы учитывают медико-экологические аспекты, упоминающиеся, однако, в самом общем виде.

Принципиальной моделью для решения трансграничных экологических проблем в регионах может служить упомянутая Конвенция ЕЭК ООН, которая охватывает все аспекты, связанные с использованием и охраной вод, включая обмен информацией, совместные научные исследования, координацию нормативно-правовых документов, внедрение совместных систем мониторинга, координацию водохозяйственных и водоохраных мероприятий, экологическое образование [12]. Однако было бы большим преувеличением утверждать, что сформулированные принципы полноценно учитываются многими странами (особенно развивающимися) в силу ограниченных экономических возможностей. Удачным примером выполне-

ния требований по обеспечению качества воды трансграничного водотока является улучшение воды р. Колорадо (США, штат Аризона) поступающей в Мексику. Американцы создали на приграничной территории завод для периодического опреснения речной воды системами обратного осмоса (100 млн галлонов/сутки – 262 м<sup>3</sup>/мин), сбрасываемой обратно в реку для выравнивания качества воды до регламентируемого уровня. При личном ознакомлении с этим объектом особое внимание привлекли десятки объединённых единой управляющей системой ветровых энергоисточников, обеспечивающих значительное снижение необходимого здесь финансирования.

Проведённые исследования показали, что оценка медико-экологических последствий реализации того или иного трансграничного водохозяйственного соглашения должна учитывать возможные последствия для различных сфер среды обитания человека (вода, воздух, почва), состояние которых способно влиять на санитарные условия жизни и состояние здоровья населения. При этом важна оценка воздействия трех групп факторов – биологических (бактериологических, вирусных и др.), физических (механических, электромагнитных, радиационных и др.), химических (отдельные вещества, группа веществ и др.) и определить характер (токсикологическое, радиационное, тепловое, шумовое, биологическое) и степень воздействия (сильная, умеренная, слабая, нарастающая, убывающая), его масштаб во времени (от необозримого до быстро исчезающего) и пространстве (от глобального до локального) с учётом зоны влияния. Здесь было необходимо использование и экосистемного подхода. Одним из эффективных разделов такой оценки явилось рассмотрение вероятных изменений сложившейся медико-демографической ситуации и санитарно-эпидемиологической обстановки, характеризуемых вероятными изменениями обводнённости территории, в т.ч. и при избыточном водопотреблении на сопредельной территории [31].

Исследование этой проблемы делало очевидным, что при трансграничном использовании того или иного водного объекта защита здоровья населения, как на территории донора, так и на «принимающей» территории необходимо достаточное развитие системы социально-гигиенического мониторинга, и медико-экологического районирования, что существенно облегчило бы получение полноценных данных, характеризующих зависимости показателей здо-

вья населения от характера воздействия биологических и химических компонентов вод [31].

То задачи, возникающие в связи с формированием международных соглашений в области использования трансграничных вод, могут эффективно решаться лишь при условии применения медико-экологического, междисциплинарного подхода, объединяющего природоведческие и медицинские дисциплины. Практически это означает базирование оценочных и прогностических медико-экологических построений на аналогичных проработках смежных дисциплинарных направлений – гидрогеологическом, геологическом, технико-технологическом, социально-экономическом. На практике это связано с проведением научных исследований медико-экологических последствий принятия того или иного варианта соглашения. Для практической реализации этого положения представляется возможным использование выше упомянутого алгоритма построения обосновывающих медико-экологических исследований [33].

Изложенные в данном разделе материалы приобретают особое значение в связи с появляющимися проектами возрождения идей переброски части стока сибирских рек в Китай и Казахстан. В свете приведённых выше международных Конвенций, использование этого гидротехнического способа окажется возможным только при условии огромных капиталовложений в систему водоохраных мероприятий, например, на Иртыше, водность которого и качество воды уже сейчас требуют принятия энергичных мер для обеспечения его экологического благополучия и полноценного водопользования всех потребителей [32].

В заключение следует подчеркнуть, что результативность медико-экологических исследований водных проблем в ИВП РАН была обеспечена взаимодействием с ведущими научными центрами профилактического медицинского профиля и смежных немедицинских научно-дисциплинарных природоведческих направлений. Такому характеру исследований активно способствовали и Научный совет РАН по проблемам биосферы и Научный совет РАН по проблемам Каспия, и Российская экологическая академия и РАЕН. Это касается и тесных научных связей и внутри самого ИВП, прежде всего с гидрогеологами. Существенную роль сыграли многолетние поддержки крупных государственных научных фондов – РФФИ и РНФ. Интерес

к этим работам постоянно проявляли организаторы многих крупных отечественных и зарубежных научных конгрессов, что не только свидетельствовало о значимости ведущихся исследований, но и обеспечивало упрочение новых междисциплинарных подходов. Нельзя не отметить и внимание весьма значимых международных организаций, таких как ООН и ВОЗ, «Врачи без границ», неоднократно рассматривавших в своих профильных отделах и на совещаниях доклады об итогах проведенных изысканий. Поддержка работ ИВП на ежегодных объединённых пленумах АМН и Минздрава РФ позволяет отметить, что медико-экологическому направлению исследований не следует противопоставлять фундаментальный и научно-практический гигиенический подходы к оценке и прогнозированию влияния водного фактора на условия жизни и здоровье населения. Они всё более и более дополняют друг друга, взаимно адаптируя и развивая основные принципиальные положения каждого из них. Об этом свидетельствует и отмеченное выше постоянное участие ведущих научных центров профилактического профиля системы здравоохранения в исследованиях проводимых в ИВП РАН.

Необходимо указать, что за 40 лет развития данного направления банк данных о причинно-следственных связях заболеваемости населения с водным фактором не только сохранил свою значимость, но и существенно расширился. Исследования эти идут во всем мире, постепенно приобретая медико-экологическую направленность, свойственную исследованиям ИВП РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Санин М.В., Эльпинер Л.И. Опреснение солёных и солоноватых вод как глобальная проблема // Известия АН СССР. Сер. геогр. №86, 1983. С. 18–29.
2. Авакян А.Б., Эльпинер Л.И. Медико-биологические аспекты проблем крупномасштабного перераспределения речного стока // Водные ресурсы. №6, 1979. С. 25–36.
3. Авакян А.Б., Эльпинер Л.И., Делицин В.М. Медико-биологические проблемы гидротехнического строительства // Гидротехническое строительство. №10, 1987. С. 19–21.
4. Беэр С.А., Эльпинер Л.И., Воронин М.В. Паразитарные системы и водный фактор (подходы к районированию территории речных бассейнов по паразитологическим критериям) // Медицинская паразитология. №4, 2011. С. 18–24.

5. Баренбойм Г.М., Чиганова М.А. Загрязнение природных вод лекарствами. М.: Наука, 2015. 283 с.
6. Водохранилища и их воздействия на окружающую среду (отв. ред. Г.В. Воропаев, А.Б. Авакян). М.: Наука, 1986. 367 с.
7. Водохранилища мира. (отв. ред. Г.В. Воропаев, С.Л. Вендрев). М.: Наука, 1979. 287 с.
8. Временные методические рекомендации к изучению санитарных условий водопользования и жизни населения при территориальном перераспределении стока рек. МЗ СССР, 1978, №1902-78/121-дт/193-41,
9. Гамзатов Г.Г. Социально-экологические последствия изменений природной среды на Дагестанском побережье Каспийского моря / Сб. рефератов междунар. конф. «Каспий-95». М.: ИнгеоСентр, 1995. С. 65–69.
10. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М.: Научный мир, 2010. 232 с.
11. Зекцер И.С., Эльпинер Л.И. Ресурсный потенциал подземных вод в проблеме полноценного и безопасного для здоровья населения хозяйствственно-питьевого водоснабжения // Водоснабжение и канализация. №5–6, 2016. С. 7–14.
12. Конвенция ЕЭК ООН По охране и использовании трансграничных водотоков и международных озер» (1993) года / Бюллетень международных договоров, Охрана окружающей среды. Межд. правовые акты. Справочник. №10. СПб, 1994. 116 с.
13. Медико-экологические проблемы Аральского кризиса / Под. ред. В.П. Сергеева, С.А. Безра, Л.И. Эльпинера. М.: ВИНТИ, 1993. 101 с.
14. Новиков Ю.В., Спиридовон А.М., Куценко Г.И., Сайфутдинов М. М., Сергеева Н.М. Особенности водопользования и охрана здоровья населения в районах каскадного регулирования стока реки Волги. Медгиз, 2000, 144 с.
15. Онищенко Г.Г. Угрозы здоровью человека: гигиенические проблемы и пути их решения / Материалы Пленума межведомственного совета по экологии человека и гигиене окружающей среды Российской Федерации. М. НИИЧЕГОС, 2002, С. 3–9.
16. Пинигин М.А., Черепов Е.М., Эльпинер Л.И. Принципы гигиенического районирования бассейнов рек // Матер. Межд. Конгр. «Вода: экология и технология». М.: Сибико Интернэшнл, 1998. С. 632–633.
17. Позняков А. Интервью с В.И. Даниловым-Данильяном. Сколько стоил бы поворот сибирских рек? Интернет ресурс – <http://www. http://archive.is/I5vyH>
18. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду Р 2.1.10.1920-04. М.: МЗ РФ, 2004.
19. Руководство по прогнозированию медико-биологических последствий гидротехнического строительства. (отв. ред. Л.И. Эльпинер, С.А. Безэр). М., Научный совет по проблемам биосфера АН СССР, Институт водных проблем АН СССР, 1990. 172 с.

20. Эльпинер Л.И., Бокина А.И., Шафиров Ю.Б. Гигиеническая оценка воды опреснённой эвапорацией // Гигиена и санитария. №6, 1969. С. 22–25.
21. Эльпинер Л.И., Васильев В.С. Проблемы питьевого водоснабжения в США. М.: Наука, 1983. 168 с.
22. Эльпинер Л.И. О влиянии водного фактора на состояние здоровья населения России // Водные ресурсы. Т. 22, №4, 1995. С. 418–25.
23. Эльпинер Л.И. Некоторые теоретические положения к изучению медико-экологических аспектов в условиях проектируемого территориального перераспределения водных ресурсов // Сб. научных трудов Моск. ННИГ им. Ф.Ф. Эрисмана. «Санитарные условия водопользования и здоровье населения в связи с перераспределением речного стока». М., 1985. С. 14–18.
24. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты изучения роли водного фактора в среде обитания человека // Водные ресурсы. №5, 1989. С. 41–48
25. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты Аральской катастрофы // Известия АН СССР. Сер. географ. №4, 1991. С. 103–112.
26. Эльпине Л.И., Чупис А.В., Панасовский Ю.В. Социально-экологические вопросы использования водных ресурсов. М.: Наука, 1992., 135 с.
27. Эльпинер Л.И. Влияние гидрологической обстановки на санитарные условия жизни и состояние здоровья населения / Региональные проблемы здоровья населения. М.: Медгиз, 1993. С. 50–56.
28. Эльпинер Л.И., Зеегофер Ю.О., Вакар Н.Г. Геоэкологические и медико-экологические проблемы использования подземных вод (на территориях мега- и технополисов) // Инженерная экология. №3, 1998. С. 21–30.
29. Эльпинер Л.И. Междисциплинарный подход к решению водных проблем // Материалы III Международного конгресса «Вода: экология и технология» М.: Сибирико Интернэшнл, 1998. С. 138–143.
30. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты Каспийской проблемы // Аридные экосистемы. №3, 1998. С. 22–27.
31. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты проблемы управления трансграничными водными ресурсами // Материалы второй международной конференции «Управление трансграничными водными ресурсами». М.: МГУП, 2010. С. 151–156.
32. Эльпинер Л.И., Тарасов О.В. Санитарно-гигиенические вопросы проектирования Красногорского водоподъёмного гидроузла на р. Иртыш // Мелиорация и водное хозяйство. №1, 2011. С. 29–33.
33. Эльпинер Л.И. Медико-экологические подходы к интегральному управлению водными ресурсами // Гигиена и санитария. №5, 2012. С.12–17.
34. Эльпинер Л.И. Медико-экологические проблемы использования питьевых подземных вод // Зекцер И.С. Поземный сток и ресурсы пресных подземных вод. М.: Научный мир, 2012. С. 307–343.
35. Эльпинер Л.И., Шаповалов А.Е. Влияние качества потребляемой воды на здоровье детского населения Смоленской области // Вопросы

географии. Сб. 133. М.: Московский центр Русского географического общества, 2012. С. 146–156.

36. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты кризиса питьевого водоснабжения // Гигиена и санитария. №6, 2013. С. 38–44.

37. Эльпинер Л.И. Медицинская гидрогеология – сформировавшийся раздел науки о подземных водах / Материалы Пленума научного совета РФ по экологии человека и гигиене окружающей среды // Под ред. Ю.А. Рахманина. М.: МЗ РФ, Отд. мед. наук РАН, 2014. С. 481–485.

38. Эльпинер Л.И. Медико-экологические аспекты современной гидрогеологии // Вода: химия и экология. №01, 2016. С. 30–35.

39. Эльпинер Л.И. Оценка риска для здоровья в проблеме глобального потепления климата // Гигиена и санитария. №6, 2002. С. 42–45.

40. Эльпинер Л.И. Сценарий возможного влияния изменения гидрологической обстановки на медико-экологическую ситуацию (к проблеме глобальных гидроклиматических изменений) // Водные ресурсы. Т. 30, №4, 2003. С. 473–484.

41. Яковлев С.В., Эльпинер Л.И., Нечаев А.П., Мясникова Е.В., Максимов А.В., Кочарян А.Г. Принцип оценки источников загрязнения поверхностных водных объектов // Мелиорация и водное хозяйство. №1, 2001. С. 36–42.

42. Яншин А.Л. Экологические следствия начавшегося глобального потепления климата // Материалы Международного конгресса «Вода: экология и технология» М.: Сибико Интернейшнел, 1994. С. 58–61.

43. Романенко В.Д., Оксюк О.П. и др. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты // Отв. ред. Ю.П. Зайцев. Киев: Наукова думка, 1990. 256 с.

44. Elpiner L.I. Dynamics of development of medico-ecological situation of arid zones of ecological crisis. (Analysis of causes, problems meaning situation) / in monogr Environmental problems and sustainable development in the Aral Sea basin. (Ed. by Glantz M.H.). UK. Cambridge. University Press, 1999. P. 128–156.

45. Medical and ecological significance of the water factor / In monogr. Geology and Ecosystems., Springer USA, 2005. P. 219–228.

46. Elpiner L. Groundwater Use and Public Health. / in monogr. I.S. Zektser Groundwater and the environment. Lewis Publishers, USA, 2000. P. 125–146

47. Krasovsky G, Gheldakova Z., Elpiner L and as. / Hygienic criteria of drinking water quality (ed. by G. Krassovsky). M. UNEP, WHO, 1986. 315 p.

## **Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод**

*E.B. Веницианов, М.А. Чиганова, Г.В. Аджиенко*

Современное состояние качества поверхностных вод, по данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды в Российской Федерации (опубликованы доклады до 2015 г. вкл.) является стабильным, однако характеризуется рядом проблем.

По критериям, принятым в развитых странах, состояние водного хозяйства РФ следует характеризовать как кризисное. Услугами централизованного водоснабжения в РФ пользуются около 109 млн человек, или до 75% общей численности населения страны. В крупных и средних городах услугами централизованного водоснабжения пользуется почти всё население, в малых городах, посёлках городского типа и сельских населённых пунктах этот показатель не превышает 60%. По уровню доступа населения к системам централизованного водоснабжения РФ уступает развитым странам, в которых этот показатель составляет 90–95% и более. Из общего объёма воды, подаваемой в централизованные системы коммунального водоснабжения, через системы водоподготовки пропускается не более 59%, в сельских населённых пунктах этот показатель не превышает 20%. Около 27% водозаборов из поверхностных источников водоснабжения не имеют необходимого комплекса очистных сооружений, в том числе 16% – не оснащены обеззараживающими установками. Каждый второй житель РФ вынужден использовать для питьевых целей воду, не соответствующую по ряду показателей установленным нормативам [1].

Основная проблема – плохое состояние качества воды в большинстве используемых водных объектов, недостаточны системы водоохранных мероприятий. Отсутствует достаточно полная и объективная оценка состояния экосистем водных объектов в РФ, основанная на данных государственного и других видах мониторинга.

Одну из основных задач Водной стратегии РФ до 2020 г.: охрана и восстановление водных объектов до состояния, обеспечивающего экологически благоприятные условия жизни населения, – нельзя считать выполненной.

Основные системные проблемы, которые будут более подробно рассмотрены далее:

- Несовершенство и противоречивость системы водохозяйственного регулирования;
- Отсутствие системного подхода к внедрению изменений в системе регулирования (НДВ, НДС, переход на НДТ);
- Несовершенство системы мониторинга качества, в том числе отсутствие учёта опасных загрязняющих веществ;
- Практическое отсутствие риск-ориентированного подхода при оценке ущербов для биоты и человека.;
- Недостатки научно-методической базы управления качеством вод;
- Недостаточность финансирования целевых программ.
- Эти недостатки в конечном счёте реализуются в плохом состоянии системы управления качеством.

Основные проблемы оценки качества вод. Научно-методическая база оценки и управления качеством природных вод в РФ устарела. Она построена на представлениях середины 20 в. Это ориентация на системы ПДК и интегральные индексы. В ней мало внимания уделяется физико-химическим и гидробиологическим процессам формирования качества, взаимодействию компонентов водного объекта – водной массы, донных осадков (отложений), прибрежной зоны, биоты. Особенно тревожное положение в оценке роли источников поступления в водные объекты отходов антропогенной деятельности: статистика сбросов предприятиями загрязняющих веществ (форма 2ТП водхоз) не достоверна, перечень контролируемых компонентов устарел, отсутствуют методики оценки неконтролируемого (в т.ч. диффузного) стока и вторичных загрязнений от донных осадков. Характерно неудовлетворительное состояние водоохраных зон практически во всех индустриально развитых регионах страны [2]. Устарела методическая и приборная база мониторинга качества вод. Не проводится мониторинг микрозагрязнений, прежде всего ксенобиотиков, хотя в развитых странах эти наблюдения проводятся уже 15 лет. Отсутствует методическая база оценки вредного влияния ксенобиотиков на экологическое состояние водных объектов и организм человека. Отсутствует мониторинг донных отложений, необходимый прежде всего для водоёмов и водохранилищ.

В значительной степени такая ситуация, угрожающая безопасности государства, обусловлена общезэкономическими причинами.

В экономике, переживающей нелёгкие времена, трудно найти инвестиции для развития и даже для поддержания (т.е. хотя бы для реновации физически изношенного оборудования) инфраструктуры, в том числе и такой отрасли, как водное хозяйство. Существует положительная обратная связь между низким уровнем инвестиций и приростом капитала: чем ниже уровень капитaloобеспеченности отрасли, тем меньше инвестиций, и наоборот. В пущенной на самотёк экономической системе почти без исключений действует правило: богатые богатеют, бедные – беднеют (хотя бы по относительным показателям). Это правило относится и к отраслям народного хозяйства. Поэтому отрасль обороны будет богатеть, а отрасль водоохраны беднеть. Государственное управление обязано противостоять подобной тенденции. Этого требуют интересы страны. Рассмотрим некоторые, наиболее существенные изъяны системы управления водным хозяйством.

Два подхода к природоохранному регулированию. В РФ принят подход на основании нормирования воздействия с использованием предельно допустимых концентраций (ПДК), в мировой практике получивший название опасность-ориентированного подхода, или концепции «нулевого» риска. Критерием допустимости загрязнения является выполнение неравенства  $C < ПДК$ , где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества в так называемом контрольном створе. В природоохранительном законодательстве развитых стран, в частности в Европейском Союзе, уже более 20 лет происходит планомерный переход к риск-ориентированному подходу [3]. Для каждого из загрязняющих веществ на основании информации о его свойствах определяются вероятность воздействия на живые организмы и возможные негативные эффекты такого воздействия, его трансформации в водном объекте, состоянии самого водного объекта. Уровень допустимого риска учитывает экономическое состояние предприятий с использованием принципа НДТ – наилучших доступных технологий. Только на основании результатов оценки рисков принимается решение о способах водоохраны, а также о размере платежей за загрязнение.

В настоящее время в РФ существуют две основные системы нормативов качества природных поверхностных вод – при водохозяйственном (ПДКв) и рыбохозяйственном (ПДКвр) использовании вод-

ных объектов. Каждая из этих систем устанавливает единый норматив для всех водных объектов страны, несмотря на огромное различие физико-географических, климатических и социально-экономических условий. При этом рыбохозяйственные нормативы более жёсткие, чем водохозяйственные для большинства контролируемых загрязняющих веществ. На практике именно рыбохозяйственные нормативы используются как основные нормативы качества. Начиная с Постановления Совмина СССР №1045 от 15 сентября 1958 г. «О воспроизводстве и об охране рыбных запасов во внутренних водоёмах СССР» без каких-либо ограничений и исключений все водные объекты рассматриваются как рыбохозяйственные.

Проблема не только в том, чтобы стандарты и нормативы были научно обоснованы, они должны соответствовать возможностям экономики, которая в экологическом аспекте всё ещё живёт за счёт будущих поколений. Что касается современного бизнес-сообщества РФ, то оно ни технологически, ни экономически не готово к выполнению действующих высоких стандартов.

Установление технологически недостижимых, экономически неоправданных и экологически необоснованно жёстких нормативов приводит, вопреки намерениям законодателей, не к улучшению экологической ситуации, а к её ухудшению. Любой хозяйствующий субъект, чтобы обеспечить рентабельность своего производства, может выделить лишь ограниченный ресурс на очистку сточных вод, реализацию водоохраных мероприятий и т.п. Если для выполнения установленных нормативов требуются затраты, превышающие этот ресурс, водопользователь вынужден решать свои проблемы вне рамок правового поля, не заботясь о поэтапным проведении непосильных для него водоохраных мероприятий. Более того, такой способ «решения» проблем взаимодействия с государственными органами начинает интересовать и тех, кому целесообразные меры вполне по силам. Выход за рамки правового поля, конечно, юридически недопустим, но он экономически целесообразен. По некоторым оценкам, стоимость такого решения проблем водоохраны порядка десятков млрд руб. в год, что сопоставимо с объёмом средств, легально выделяемых на водоохраные цели.

Критика распространения рыбохозяйственных нормативов на все водные объекты страны не означает каких-либо претензий к

самому рыбному хозяйству как водопользователю. Рыбное хозяйство (рыболовство и рыбоводство) – один из важнейших видов хозяйственного использования водных объектов, обоснованно предъявляющий наиболее жёсткие требования к качеству воды. Оно испытывает немалые трудности из-за того, что до сих пор не сформулированы чёткие условия определения статуса водного объекта (или его участка) как рыбохозяйственного и критерии его зонирования для участков нереста, нагула, промысла. При этом должен учитываться видовой состав рыбной фауны, с выделением объектов, где обитают ценные виды.

Другим примером непродуманных нормативных требований является Приказ МПР РФ №333 от 17 декабря 2007 г. «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей». В п. 8 Методики указано: для сброса сточных вод в черте населённого пункта норматив допустимого сброса (НДС) определяется, исходя из отнесения нормативных требований к составу и свойствам воды водного объекта к самим сточным водам. Однако понятие «чёрта» (граница) населённого пункта по-разному определяется в различных законах, имеющих отношение к рассматриваемому аспекту проблемы (Земельный кодекс РФ, Градостроительный кодекс РФ и ФЗ-131 «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации»), и до сих пор не разъяснено, какому из них надлежит следовать при выполнении этого приказа.

Согласно указанным нормативно-методическим документам, качество сточных вод должно быть значительно лучше, чем воды питьевого назначения. Более того, нормативы по алюминию, свинцу, цинку, меди даже более жёсткие, чем требования ГОСТ 6709-72 Вода дистиллированная.

Управление качеством воды в водных объектах Требования к качеству отводимой воды должны учитывать фоновые концентрации, которые различаются для водных объектов, расположенных в разных физико-географических и климатических зонах, а в отдельных случаях необходимо принимать во внимание и локальные особенности водных объектов.

Актуальной проблемой для РФ является переход на принцип нормирования в соответствии с наилучшими доступными технологиями

гиями (НДТ) по отраслям промышленности и ЖКХ. Сделан первый шаг: разработаны Информационно-технологические справочники по НДТ некоторых отраслей. Однако до сих пор отсутствует процедура перехода от действующей системы регулирования сбросов на основе НДС к системе, основанной на НДТ. Мы рискуем повторить печальный опыт с нормативами допустимых воздействий (НДВ), которые были разработаны при затратах в сотни миллионов рублей для бассейнов всех крупных рек и, однако, так и не включены в систему регулирования сбросов сточных вод.

Значительная часть загрязняющих веществ аккумулируется в донных отложениях. Следует иметь в виду, что водохранилища, созданные на многих равнинных российских реках – это огромные отстойники. Научные исследования последних лет показали, что объём и химический состав этих отложений в настоящее время таковы, что вероятность выхода вторичных загрязнений высока. Однако у нас отсутствуют какие-либо нормативы содержания загрязняющих веществ в донных осадках. Фактически отсутствует мониторинг донных отложений, хотя Водный кодекс РФ предписывает ведение «мониторинга состояния дна и берегов водных объектов, а также состояния водоохранных зон» (пункт 5.2 части 4 статьи 30).

Публикуемые данные не дают полной картины об источниках загрязнения водных объектов, так как содержат лишь качественные по сути характеристики сточных вод: загрязнённые, очищенные и пр. Форма отчётности 2ТП Водхоз составляется самими предприятиями, и достоверность такой исходной информации сомнительна. К тому же эти данные характеризуют лишь часть источников загрязнения. Диффузные неконтролируемые источники для ряда водных объектов превышают объём загрязнений от контролируемых точечных источников [4]. В условиях недостатка информации о реальном состоянии охраняемых водных объектов появляются весьма спорные документы, например Распоряжение Правительства РФ от 8 июля 2015 г. №1316-р «Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды». Не пояснен термин «меры государственного регулирования». Но более важен другой вопрос: в этом Распоряжении приведён список из 140 веществ и 17 стойких органических веществ в воде водных объектов, но количество ПДКв

и ПДКвр значительно больше, и их списки пополняются. Как быть, если загрязняющее вещество найдено в концентрации, превышающей ПДК, но не входит в Перечень указанного Распоряжения Правительства? И наоборот: концентрация меньше ПДК, но вещество входит в этот Перечень – надо ли к нему применять «меры государственного регулирования», и если надо, то какие?

Наконец, номенклатура поллютантов (ни в каких документах) не включает большие группы загрязняющих веществ, называемых ксенобиотиками. В частности, это лекарства, химические бытовые и промышленные средства и др., обладающие высокой биологической активностью. В развитых странах загрязнению ксенобиотиками уделяется большое внимание. Несмотря на относительно низкие концентрации, их воздействие на обитателей водных объектов и человека через потребляемую питьевую воду весьма значительно. Это особенно существенно для рек – источников питьевого водоснабжения, так как типовые системы водоочистки не ориентированы на удаление этих веществ.

Одним из актуальных вопросов в области охраны и рационального использования водных объектов является выделение из всего множества водных объектов тех, которые подлежат охране и на которые распространяются действующие нормативно-методические документы в области охраны вод. Забота об использовании ресурсов и сохранении водного объекта должна зависеть от того, в каком качестве он фигурирует в государственном учёте поверхностных и подземных вод, т.е. в государственном водном кадастре (статья 79 Водного кодекса РФ). Однако такой градации «водный объект» вообще и «охраняемый водный объект» в нём не предусмотрена. «Охраняемый водный объект» должен представлять интерес для водного хозяйства, экономики территории и техногенные воздействия способны ухудшить его потребительские свойства. Одним из видов водопользования является эксплуатация водотока как коллектора транспортировки сточных вод. Следует разработать критерии допустимости такого вида водопользования. Например, река Пехорка на 90% состоит из сточных вод Люберецких очистных сооружений, однако рассматривается как рыбохозяйственный объект.

Проблемы экономического обеспечения управления водопользованием. Ключевая проблема российского водного хозяйства –

оторванность его экономического механизма от реальных потребностей управления водопользованием, прежде всего – водоохраны. В Государственном докладе «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2015 году» сообщается, что в условиях сопоставимых ценах текущие затраты на охрану и рациональное использование водных ресурсов в 2015 г. по сравнению с 2005 г. составили 85–86%.

За последние 5 лет имеет место уменьшение суммарного поступления водного налога и платежей за водопользование в номинальном исчислении. В реальном исчислении с поправками на инфляцию сумма поступлений от водного налога и платежей за негативное воздействие на водные объекты (оценённая по своего рода «покупательной» способности рубля) к 2016 г. за 10 лет уменьшилась в четыре раза. Капиталовложения в водоохрану и рациональное использование водных ресурсов из всех источников финансирования за последние 10 лет находились на уровне 25–30 млрд руб. в сопоставимых ценах, т.е. фактически неросли.

По оценке специалистов, готовящих новый вариант Стратегии развития водного хозяйства РФ (на этот раз до 2030 г.), по сценарию неухудшения состояния водных ресурсов требуется ежегодно сумма порядка 45 млрд руб., а для улучшения состояния – более 70 млрд руб. Очевидно, что для осуществления подобных предположений требуется резко увеличить либо бюджетную поддержку водоохраных мероприятий, либо в несколько раз повысить ставки водного налога. Радикальное изменение ситуации с финансированием водного хозяйства имеет ключевое значение для экологического благополучия водных ресурсов РФ и, в конечном счёте, для здоровья населения.

Следует также отметить незначительную роль разработанных во всех бассейнах в соответствии с Водным кодексом РФ Схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО), которые должны были, в частности, обеспечить экологически и экономически обоснованные программы мероприятий по улучшению состояния водных ресурсов.

Концепция СКИОВО, разработанная ещё в 1980-е гг., безнадёжно устарела. В большинстве стран влияние сбросов сточных вод предприятий (как действующих, так и проектируемых) оценивается с

использованием математических моделей. Заметим, что в США для расчёта Total Maximum Daily Load (TMDL) – нормативного показателя (аналога НДС и НДВ), устанавливающего общую максимальную суточную нагрузку на участок водного объекта или объект в целом, используются сертифицированные программные комплексы, ориентированные на индивидуальный подход для каждого водного объекта и каждого водопользователя [5]. В РФ до сих пор используются расчётные методы начала 1950-х гг.

Вместо пухлых томов СКИОВО во всех водохозяйственных организациях должны появиться компьютерные информационно-вычислительные системы, оснащённые моделями «подведомственных» бассейнов и их участков. Это будет намного эффективнее и дешевле, чем неработающие СКИОВО. Конечно, переход к использованию информационно-вычислительных систем как основному инструментальному средству в управлении водным хозяйством и водными ресурсами потребует радикальных изменений в подготовке кадров для отрасли.

В заключение подчеркнём, что часто повторяемый тезис о водном богатстве РФ, будучи справедливым «в общем и целом», не должен заслонять серьёзные проблемы водохозяйственной отрасли.

#### **Современные подходы определения и оценки опасности органических ксенобиотиков при анализе качества вод.**

При оценке качества вод большой сложностью отличается определение и идентификация органических ксенобиотиков, которые представляют собой самые разнообразные классы химических соединений, что приводит к необходимости специфической пробоподготовки при анализе. В воде помимо антропогенных органических соединений содержится огромное количество природных – это продукты метаболизма водных организмов, вещества, образовавшиеся вследствие разложения высшей водной растительности, разнообразные осколки гуминовых кислот и т.д. В водных пробах обнаруживаются соли, кислоты, альдегиды, т.е. практически все классы химических соединений.

В настоящее время существует огромное количество органических соединений, для каждого из которых просто невозможно или даже не нужно разрабатывать и утверждать методики идентификации и определения. В этом случае наиболее общими являются

методы тотального определения (скрининга), которые позволяют определять весь спектр соединений, ограниченный только чувствительностью прибора и его разрешением. Такие методы, как правило, уступают по чувствительности и разрешению методам, ориентированным на индивидуальное вещество или их определённый класс.

Исходя из того, что с точки зрения аналитики вода – сложная смесь веществ, в том числе органических ксенобиотиков – возможны различные направления их поиска, а именно: 1) поиск конкретных веществ; 2) поиск по химическим классам; 3) поиск по классам функциональных назначений веществ; 4) поиск по профилю источника загрязнения; 5) поиск особо опасных веществ; 6) тотальный скрининг; 7) поиск по другим принципам. Отметим, что различные направления поиска частично перекрываются.

Отметим, что на реальные проявления опасного действия конкретного ксенобиотика могут оказывать влияние другие вещества, находящиеся в воде. Очевидно, что такое влияние может характеризоваться суммацией, антагонизмом или потенцированием [6]. Поэтому, на наш взгляд, даже при осуществлении идентификации индивидуальных соединений по специальным методикам тотальный скрининг является обязательным.

Согласно «Правилам охраны поверхностных вод» (утв. Госкомприроды СССР 21 февраля 1991 г.), запрещается сбрасывать в водные объекты возвратные (сточные) воды, содержащие вещества или продукты трансформации веществ в воде, для которых не установлены ПДК или ОДУ, а также вещества, для которых отсутствуют методы аналитического контроля, за исключением тех веществ, что содержатся в воде водного объекта. Однако реально это положение не соблюдается, в воду могут попадать соединения, для которых отсутствуют нормированные значения ПДК. Кроме того, соединения в воде подвергаются всевозможной физико-химической и метаболической трансформации, в результате которой могут образовываться вещества, зачастую более опасные, чем исходные, причём для этих вторичных продуктов значение ПДК отсутствует в подавляющем большинстве случаев.

Таким образом, анализ качества природных вод, особенно тех, которые используются как источники питьевого водоснабжения,

требует понимания многокомпонентности загрязнения, представления о потенциальном наличии синергизма и о необходимости идентифицировать вещества, для которых нет формализованных и нормативных методик.

Из анализа литературы следует, что хроматография и хромато-масс-спектрометрия в настоящее время являются самыми распространёнными и наиболее часто используемыми методами химического анализа для идентификации органических соединений. Ни один аналитический метод не может конкурировать с хроматографией и масс-спектрометрией по универсальности применения и эффективности разделения самых сложных многокомпонентных смесей. Используя хроматографию, можно определить содержание супертоксикантов, в частности полихлорированных диоксинов в объектах окружающей среды при крайне низких концентрациях этих веществ.

К этому же утверждению приводит и анализ научно-технического исследования. В табл. 1 приведены сведения по числу докладов на Питтсбургской конференции по аналитической химии и прикладной спектроскопии (PITTCON 2016), которая является наиболее представительной в мире по разным методам анализа [по числу участников (14 000–20 000), подготовленных докладов (около 2000), а также фирм – производителей оборудования (около 1000) на выставке, проходившей в рамках конференции]. Интерес к хроматографии очень большой: сегодня около 60% химических анализов во всех странах мира выполняются хроматографическими методами [7]. Среди хроматографических методов высокоеффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) опережает метод газовой хроматографии; интенсивно развивается сверхвысокоэффективная жидкостная хроматография. Продолжается рост интереса к сверхкритической флюидной хроматографии (СФХ). Главная причина успеха – совершенная аппаратура, выпускаемая для СФХ. Есть работы, в которых сочетаются методы сверхкритической экстракции (СФЭ) и СФХ (СФЭ+СФХ).

Обзор методов и технических средств обнаружения органических соединений [8] позволяет утверждать, что в принципе возможна идентификация любых органических ксенобиотиков, находящихся в воде, в концентрациях  $10^{-9}$  г/дм<sup>3</sup>, а в ряде случаев до  $10^{-12}$  г/дм<sup>3</sup> при соответствующей пробоподготовке и выборе опти-

Таблица 1

## Современные методы анализа (по материалам PITTCON 2016) [7]

Методы	Число докладов
Хроматография (в том числе хроматомасс-спектрометрия – 146)	378
Спектроскопия (все методы)	194
Электрохимия	131
Масс-спектрометрия (без хроматографии)	116
Сенсоры (все типы)	92
Капиллярный электрофорез	37
Микроскопия	22
Химический анализ	11

Методы хроматографии	Число докладов
ВЭЖХ	79
Ультра-ВЭЖХ	21
ВЭЖХ-МС и ВЭЖХ-МС/МС	57
Гидрофильтральная	8
Ионная	8
Хиральная	6
Сверхкритическая флюидная	43
ГХ (из них ГХ-М и ГХ-МС-МС)	139 (81)
ГХ-ГХ	7
ГХ-ГХ-МС	11
Пиролизная	4
ГХ-ИКС	3

мального метода для идентификации и определения количественного содержания идентифицируемого соединения в воде. Идентификация соединений, находящихся в воде, позволяет не только формально определить их номенклатуру, а также брутто- и структурные формулы, но и на основе этих данных оценить вид их опасного действия, а в некоторых случаях и пределы опасных концентраций даже при отсутствии нормированных значений ПДК для них.

Для этого разумно использовать расчётные методы оценки вида токсичности вещества и его опасных концентраций, которые формируются на основе знаний структуры вещества и/или его физико-химических характеристик, а также на информационные техноло-

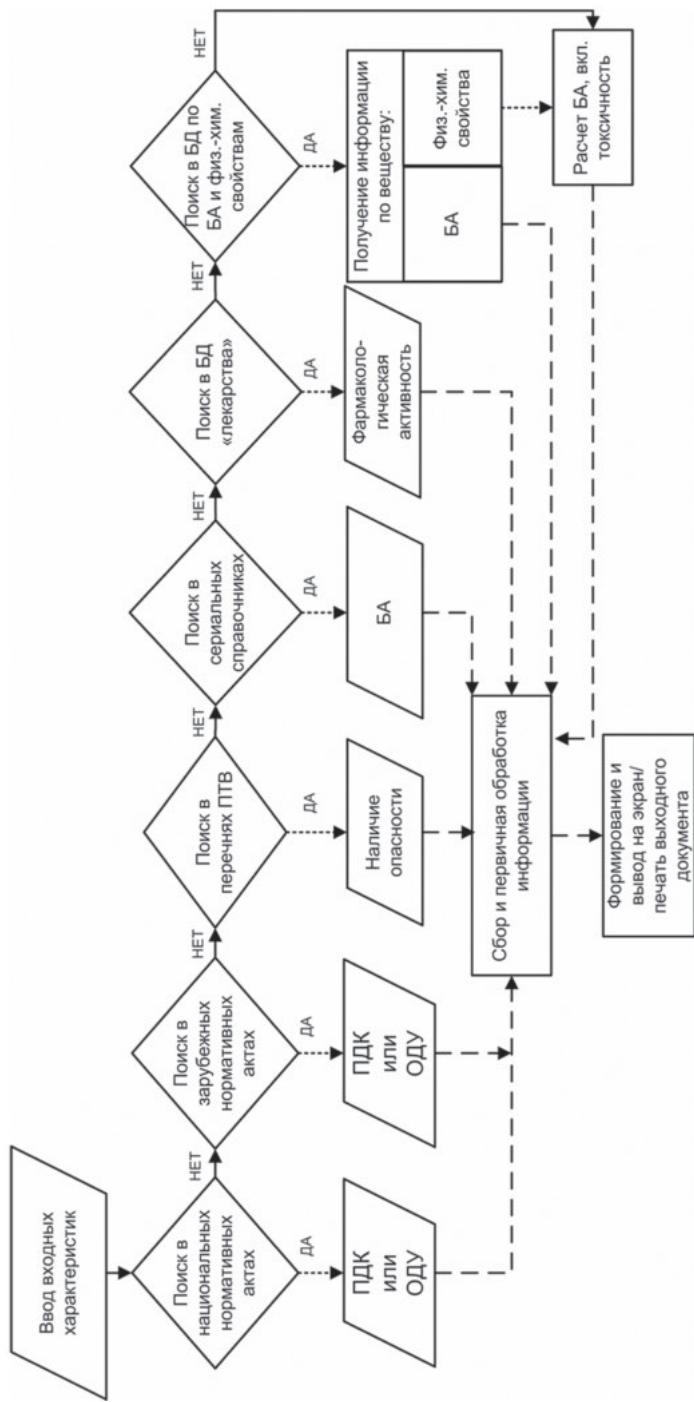


Рис. 1 Информационные технологии оценки опасности ксенобиотического, включая лекарственное, загрязнения (под БД «лекарства» понимаются синонимическая БД, содержащая химическую структуру, химическое название, синонимы и некоторые свойства, включая токсичность) и БД мегаболитов).  
 БА – биологическая активность, БД – базы данных, ОДУ – ориентировочно допустимый уровень, ПДК – предельно допустимая концентрация, ПТВ – приоритетно токсичные вещества

гии, связанные с поиском сведений об опасности веществ в международных базах данных и регистрах (рис. 1).

В разработанной системе используется 14 международных и национальных баз данных, среди которых 10 являются легитимными по отношению к РФ, и программа прогноза биологической активности соединений по их структуре (Prediction of activity spectra for substances – PASS) [9, 10].

Обучающая выборка в дескрипторном анализе по схожести содержит экспериментальные данные об активности входящих в неё соединений, включая фармакологические и токсические виды активности, с указанием мишени, концентрации и ряда других особенностей проявления этой активности. Поэтому для прогноза спектра биологической активности и, в частности, токсичности целесообразно использовать системы, основанные на применении обучающей выборки.

Современная версия компьютерной программы PASS 2014 прогнозирует 7157 активностей на основе данных о 959 801 соединениях. Средняя точность предсказания, рассчитанная по методу исключения по одному, составляет 94,1% [9, 10]. Список прогнозируемых PASS видов биологической активности включает основные и побочные фармакологические эффекты, биохимические механизмы действия, специфическую токсичность, нежелательные мишени и эффекты, связанные с метаболизмом, транспортом и влиянием на экспрессию генов. Прогнозируемые виды биологической активности можно расклассифицировать по уровням действия: целостный организм, отдельные системы организма (например нервная), отдельные органы, ткани, клетки, субклеточные структуры, биохимические реакции или биомакромолекулы. Результатом прогноза в программе являются вероятности наличия и отсутствия конкретного вида активности.

Методы на основе обучающей выборки позволяют также прогнозировать и некоторые количественные характеристики токсичности. Например, по программе GUSAR можно провести расчёт следующих экотоксикологических показателей: фактора биоаккумуляции, LD50 (средняя смертельная концентрация для дафнии и гольяна), IGC50 (концентрация полумаксимального ингибирования роста) для инфузории тетрахимена пириформис, а также показате-



Рис. 2. Концепция риск-ориентированного подхода к законодательному регулированию

ля острой токсичности LD50 для крыс (при разных способах введения в организм). Химическая структура вещества в GUSAR, как и в программе PASS, представлена дескрипторами, используемыми в программе PASS, и дескрипторами биологической активности, которые основаны на результатах прогнозирования в программе PASS [11].

Риск-ориентированный подход в законодательном регулировании качества вод. Риск-ориентированный подход к природоохранному регулированию в основе отличается от традиционного подхода, направленного на выявление и пресечение нарушений природоохранного законодательства субъектами хозяйственной деятельности, применение системы штрафов и привлечение к различным формам ответственности, а также ликвидацию последствий загрязнений ОС [12].

Оценка рисков является широко применимым подходом к решению природоохранных задач и представляет собой процедуру оценки опасностей, присущих тому или иному процессу или условию, в количественном или качественном выражении (рис. 2). Оценка экологических рисков может включать оценку рисков для здоровья человека, оценку токсикологических рисков, рисков, присущих определённой отрасли или связанных с конкретными типами предприятий, выявление предельных значений факторов, оказывающих воздействие на человека, биоту, экосистемы и др.

Риск-ориентированный подход к регулированию качества вод на законодательном уровне может быть реализован как составляющий механизм системы выдачи разрешений на осуществление хозяйственной деятельности, а также, как основа планирования и осуществления проверок соответствия законодательным требованиям (рис. 3).



Рис. 3. Место риск-ориентированного подхода в системе природоохранного регулирования

В Великобритании, Ирландии, Шотландии, Нидерландах, Португалии риск-ориентированный подход применяется при выдаче экологических разрешений на выбросы, сбросы сточных вод, использование подземных вод, обращение с отходами. Ответственными за реализацию риск-ориентированного подхода в этих странах являются органы исполнительной власти, в основном – Агентства по охране окружающей среды. Такие Агентства обычно проводят ряд универсальных оценок рисков, на основе которых разрабатываются стандартные правила для определённых видов деятельности. Такие правила включают потенциальные риски и способы управления ими. Так, в Великобритании универсальные оценки рисков проводят для ряда проектов, например, для стандартных установок биологической очистки сточных вод, установок по переработке отходов, обработке металлов, добыче полезных ископаемых и т.д. В случае, если природопользователь планирует деятельность, в отношении которой была проведена универсальная оценка рисков и разработаны стандартные правила, он не обязан проводить собственную оценку рисков для получения разрешения. В случае, если природопользователь планирует деятельность, не охваченную стандартными правилами, он должен проводить оценку рисков самостоятельно [13].

В рамках подхода к выдаче природоохранных разрешений Агентство по охране окружающей среды Великобритании подразделяет объекты лицензирования на три группы, согласно уровням негативного воздействия:

- Объекты первой группы осуществляют деятельность с низким уровнем воздействия на окружающую среду (например, транспортировка бытовых отходов или рыболовство). Требования к ним ограничиваются оплатой лицензии и прохождением редких проверок.
- Объекты второй группы функционируют в условиях стандартных разрешений и лицензий, к ним применима упрощенная Схема оценки производственных рисков (Operational Risk Appraisal Scheme, ORPA).
- Объекты третьей группы представляют собой наиболее сложные и опасные производственные объекты. Им выдаются индивидуальные разрешения, для них проводится полноценная оценка рисков по Схеме.

Необходимая степень регуляторного контроля определяется на основании текущего статуса соответствия компаний действующему законодательству (полное соответствие, преимущественное соответствие, преимущественное несоответствие, серьёзно нарушающие закон). В этой связи важную роль играет оценка производственных рисков, приводящаяся в странах ЕС на основании методологии оценивающей пять групп риск-факторов:

- Сложность объекта воздействия: вероятность существенного воздействия на одну или несколько сред (воздух, почва, вода); использование одного или нескольких взаимосвязанных, но отдельных технических процессов; вероятность аварийного выброса/сброса; наличие потенциально опасных веществ; масштаб воздействия; необходимость существенного вовлечения регуляторных органов для оценки и поддержания соответствия законодательству и общественного доверия;
- Входные и выходные потоки: состав и объём поступлений загрязняющих веществ; среда, подверженная воздействию (воздух, вода, почвы); объём образования отходов; воздействие веществ на среду поступления.
- Местоположение: близость к территории проживания населения; близость к особо охраняемым и иным природным территориям;

- чувствительность объектов приёма сбросов сточных вод; вероятность неочищенных сбросов в водную среду и наличие мер контроля; вероятность подтопления; расположение в границах зон, где качество атмосферного воздуха не соответствует целевым показателям.
- Система менеджмента предприятия и её результивность: наличие или отсутствие системы менеджмента, устанавливающей подходы к управлению негативным воздействием, обслуживания технического оборудования и др.; компетентность персонала и регулярность и полнота обучения, наличие процедур мониторинга, аудита и оценки; наличие планов действий в чрезвычайных ситуациях.
  - Степень соответствия нормативно-правовым требованиям (с использованием схемы классификации соответствия законодательству). Субъекты хозяйственной деятельности заполняют опросник по каждому из объектов негативного воздействия, находящегося в собственности. История нарушений законодательства субъекта хозяйственной деятельности.

Группы рисков, присущих конкретному виду деятельности определяются на основании специальных справочных таблиц. Группы рисков ранжируются от А до Е, группа А требует минимального вмешательства регулирующих органов, Е – максимального. Каждая из групп связана с количественным уровнем риска. Совокупность уровней риска позволяет при помощи схемы оценки выявить итоговый уровень риска для конкретного предприятия и установить соответствующую величину платы предприятия и издержек регулирующего органа [14]

Подход к риск-ориентированному регулированию качества вод можно наглядно рассмотреть на примере Агентства по охране окружающей среды Ирландии, внедрившую риск-ориентированную систему в 2007 г. Агентство проводит лицензирование предприятий, осуществляющих приём и очистку сточных вод. Для этих целей разработан специальный инструмент – Методология динамической оценки рисков (DREAM), позволяющая определить характер и обратимость экосистемных изменений при заданных параметрах деятельности и негативного воздействия таких предприятий. Методология служит инструментом принятия решений в отношении

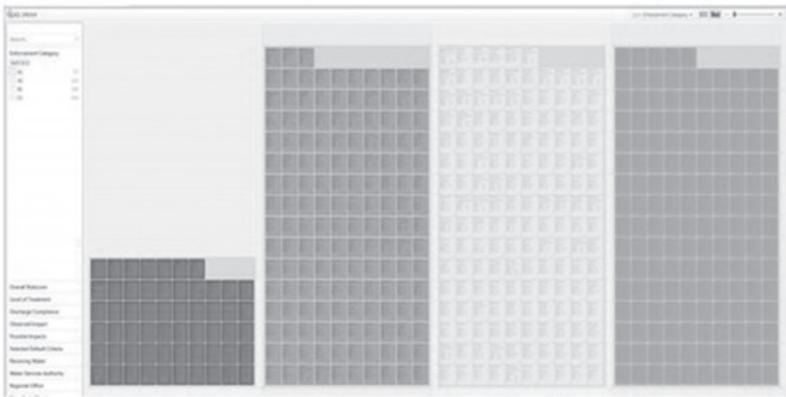


Рис. 4. Результаты оценки рисков в соответствии с методологией динамической оценки рисков DREAM

приоритетных очистных сооружений, выработке мер по достижению соответствия законодательству и улучшению качества вод. Как и в случае подхода к промышленным предприятиям, методология DREAM классифицирует риски по пяти группам: степень очистки, виды воздействия, потенциальные объекты воздействия, соответствие сбросов/выбросов требованиям законодательства, история нарушений законодательству.

Риск-ориентированная методология регулирования была разработана для фокусировки усилий исполнительных органов на объектах сбросов, обладающих значительным фактическим или потенциальным воздействием на окружающую среду. Потенциальное воздействие включает риски, связанные с близостью чувствительных зон, например, пляжей или источников питьевого водозабора. Данные о существующем воздействии собираются из баз данных системы мониторинга качества окружающей среды. Обновление данных системы приводит к соответствующему обновлению уровня рисков в динамическом режиме. Пример результирующей оценки риска приведён на рис. 4, где красным цветом обозначен самый высокий уровень риска, зелёным – самый низкий. Каждый квадрат обозначает группу риска с присвоенным баллом.

Оценка рисков от систем очистки сточных вод на предприятиях проводится в соответствии с Проектом вмешательства регулирующих органов, основанном на двух факторах: характеристиках под-



Рис. 5. Зоны риска, выявленные путем совмещения карт зонирования рисков и зонирования экологически чувствительных областей

контрольного предприятия и уровня риска отдельных видов деятельности. Характеристики подконтрольного предприятия зависят от их уровня мотивации руководства и соответствия законодательству. Виды предприятий или деятельности подразделяются на категории в зависимости от присущего им уровня риска, подходов к управлению рисками и стабильности риска, т.е. способности изменяться со временем. В отношении установок по очистке коммунально-бытовых сточных вод применяется схожая модель, но вторым фактором является экологическая чувствительность местоположения объекта. Путём совмещения карты присущих рисков и зонирования областей в зависимости от их экологической чувствительности и природоохранного значения выделяют восемь зон риска (рис. 5). Виды регуляторного вмешательства, определённые таким образом, формируют Национальный план Агентства, формируя три направления: 1) стратегию проведения осмотров и выдачи предписаний в соответствии с нормативными процедурами, 2) программы проверок и мониторинга, 3) систему вовлечения и стимулирования предприятий.

В целом риск-ориентированный подход может быть эффективной составляющей законодательного регулирования как механизм

принятия решений, способ сравнения рисков для определения метода реагирования, соответствующего уровню риска, а также как механизм определения областей в рамках сложных систем и процессов, где методы управления рисками будут наиболее эффективны. С другой стороны, объективно следует отметить, что и у риск-ориентированного подхода существует ряд недостатков. Оценка рисков сопряжена с рядом трудностей, в частности:

- недостатком информации – отсутствие первичных данных или неточность данных не позволяют сделать точный прогноз;
- неточностью измерений – недостаточность проведенных измерений, неадекватность методов измерений, ошибки измерений и т.д.;
- условиями измерений – различия между лабораторными и естественными условиями измерений ввиду особенностей климатических факторов среды, типа почвы, структуры экосистемы, различия в видовом составе;
- неточностью прогнозных моделей – недостаток знаний о механизмах, недоучет стресс-факторов, экстраполирование результатов за пределы измерений, нестабильность оценочных параметров.

### **Заключение**

Рассмотрены существенные (системные) недостатки регулирования качества природных вод. Изложены современные подходы к анализу и идентификации ксенобиотиков, содержащихся в природных водах. Представлены современные подходы к риск-ориентированному подходу при регулировании качества природных вод.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 г. №1235-р «Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года».
2. Гордин И.В. Кризис водоохраных зон России. М.: Физматлит, 2006. 196 с.
3. General Report 2015. European Chemicals Agency, Helsinki, March 2016
4. Кирпичникова Н.В. Исследование неконтролируемых источников загрязнения (на примере Иваньковского водохранилища). Автореферат на соиск. к.т.н. 1991. 24 с.
5. Guidance for Water Quality-Based Decisions: The TMDL Process. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Washington, D.C. Doc. No. EPA 440/4-91-001. April 1991.

6. Жолдакова З.И., Рахманин Ю.А., Синицына О.О. Комплексное действие веществ. Генетическая оценка и обоснование региональных нормативов. М.: НИИ ЭЧГОС им А.Н. Сысина, 2006. 234 с.
7. Яшин Я.И., Веденин А.Н., Яшин А.Я. 60 лет хроматографическому приборостроению // Аналитика. №2, 2016. С. 84–99.
8. Отто М. Современные методы аналитической химии. 3-е издание. М.: Техносфера, 2008. 544 с.
9. Filimonov D.A., Poroikov V.V. Probabilistic approach in activity prediction // Chemoinformatics Approaches to Virtual Screening. Cambridge (UK): RSC Publishing. 2008. P. 182–216.
10. Filimonov D.A., Lagunin A.A., Gloriozova T.A., Rudik A.V., Druzhilovskii D.S., Pogodin P.V., Poroikov V.V. Prediction of the biological activity spectra of organic compounds using the pass online web resource // Chemistry of Heterocyclic Compounds. V. 50 (3), 2014. P. 444–457.
11. Lagunin A., Zakharov A., Filimonov D., Poroikov V. QSAR modelling of rat acute toxicity on the basis of PASS prediction // Molecular informatics. V. 30, 2011. P. 241–250.
12. Dara L. A Strategic approach to risk based regulation by the EPA, Ireland, from: [http://risksummit.eu/wp-content/uploads/2013/03/risk-based-regulation-by-the-epa-ireland\\_dara-lynott.pdf](http://risksummit.eu/wp-content/uploads/2013/03/risk-based-regulation-by-the-epa-ireland_dara-lynott.pdf).
13. Standard rules: environmental permitting by Environment Agency UK, from: <https://www.gov.uk/government/collections/standard-rules-environmental-permitting>.
14. Risk and Regulatory Policy: Improving the Governance of Risk by OECD Reviews of Regulatory Reform, 2010, from: <http://regulatoryreform.com/wp-content/uploads/2015/02/oecd-risk-and-regulatory-policy-2010.pdf>.

# **Изучение и оценка гидрогенной динамики экосистем**

*Н.М. Новикова, Ж.В. Кузьмина*

Проблема взаимодействия вод суши с окружающей средой и ее экологические аспекты – одна из актуальнейших современных научно-практических проблем, поскольку имеет непосредственный выход на условия жизни и деятельности человека, проблему водной и продовольственной безопасности страны. Важность и необходимость проведения исследований по гидрогенной динамике наземных экосистем и их место в цикле исследований водных проблем были обоснованы в своё время профессором В.С. Залетаевым [16], известным учёным-естественником, основавшим в Институте водных проблем РАН лабораторию динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора. Залетаев справедливо считал [15], что гидрогенную динамику экосистем необходимо изучать в связи с тем, что, с одной стороны, – элементарная наземная экосистема обладает широким информационным спектром и способна быть индикатором механизмов воздействия водного фактора и трендов развития наземной среды, а с другой, – на что указывал и В.И. Вернадский [6], воды суши – результат функционирования биосфера и под влиянием современных изменений, происходящих в экосистемах, а затем и в биосфере в целом, неизбежна трансформация гидросферы нашей планеты.

Гидрогенная динамика наземных экосистем впервые, как проблема крупного масштаба, проявилась в середине 20 в. вследствие активного развития водного хозяйства в СССР: создания гидроузлов и водохранилищ при них, перевода обширных земельных массивов под орошающее земледелие, что привело к трансформации природной среды в границах речных бассейнов и крупных регионов. К 1990-м гг. в Аральском регионе сток рек Амударья и Сырдарья почти полностью разбирался на орошение и перестал поступать в море. В итоге  $\frac{2}{3}$  акватории Аральского моря обсохли, погибла солоноватоводная экосистема. В отсутствии речного стока и поемного режима погибли тугайные экосистемы речных дельт и пойм на площади 2,5 млн га, а на землях, освоенных под орошение на площади 7,4 млн га природные экосистемы были превращены в агроценозы. Около 70% освоенных земель оказались засолёнными. Трансформация при-

родной среды в этом регионе в 1990-е гг. была оценена как экологический кризис [4, 10, 91].

Водохранилища – ключевые, базовые элементы гидротехнических и водохозяйственных систем любого ранга, поскольку именно они позволяют осуществлять регулирование водных ресурсов, преобразование гидросферы в желаемом для общества пространственно-временном направлении. С их помощью решались и решаются проблемы гидроэнергетики, сельского хозяйства, судоходства, промышленного и бытового водоснабжения, и др. По справедливому высказыванию известного исследователя водохранилищ А.Б. Авакяна [1], водохранилища – феномен 20 в. Именнов 1960-егг. было создано их максимальное количество и в настоящее время в мире насчитывается более 30 тысяч крупных водохранилищ объёмом более 1 млн м<sup>3</sup>, в том числе около 2,5 тысяч водохранилищ более 100 млн м<sup>3</sup> [18]. Количество же малых и средних водохранилищ в сотни раз больше. Они – не только обычное явление на всех континентах (кроме Антарктиды), но и их роль достигла общепланетарного масштаба: объём вод суши за счёт воды, задержанной ими, увеличился приблизительно на 6,6 тыс. км<sup>3</sup> [41], и, тем самым, произошла частичная компенсация естественного отрицательного водного баланса суши, составляющего около 610 км<sup>3</sup>/год [17]. При общей площади современного водного зеркала водохранилищ на юге европейской части РФ в 400 тыс. км<sup>2</sup>, изменения природной среды произошли на площади 700 тыс. км<sup>2</sup>, а переустройство хозяйства – на территории в 1,5 млн км<sup>2</sup>, что превышает площадь зеркала самих водоёмов в несколько раз [2]. По мнению К.К. Эдельштейна [79] создание водохранилищ относится к крупнейшим мероприятиям, изменяющим природную среду в масштабе, соизмеримом с преобразованиями, внесёнными урбанизацией, сельским хозяйством, гидромелиорацией и добывчей полезных ископаемых.

Произошедшая трансформация природных экосистем на Арале и на Европейской части территории СССР определили необходимость контроля за экологическими последствиями трансформации вод суши и выдвинули в качестве первоочередных задачу проведения комплексных исследований по выявлению закономерностей динамики природных экосистем в условиях изменения водного режима крупных регионов.

Анализ изучения гидрогенной динамики наземных экосистем в зарубежных странах показал, что там исследования до сих пор не имеют комплексного характера, каждое явление и каждый вид водохозяйственного переустройства территории рассматривается индивидуально, вне связи друг с другом [54]. Так, отдельно рассматривается проблема спуска водохранилищ и зарастания обнажающегося дна [81, 93], проблем возвращения естественного режима спрямлённым участкам европейских рек [81] или рассмотрение процессов трансформации растительности в условиях заливания [88] и др. Т.е. за рубежом до сих пор не произошло осознание важности территориального анализа экологических последствий водохозяйственных преобразований природной среды и системного рассмотрения экологической роли водного фактора и его изменений в динамике наземных экосистем. Исследования экологических последствий изменения регионального климата также проводятся по отдельным видам водного хозяйства и проблемам.

### **Материалы и методы**

Методология гидрогенного изучения динамики наземных экосистем была разработана в лаборатории динамики наземных экосистем ИВП РАН, исходя из теоретического обоснования исследований водных экологических проблем и предотвращения кризисных ситуаций [15, 16, 50, 22]. Было признано, что водный фактор обладает мощным средообразующим воздействием и является активным агентом их существования и трансформации. Под «водным фактором» понимаются основные составляющие вод суши: атмосферное увлажнение, поверхностные, подземные, почвенные воды. Эти составляющие нестабильны и их изменение может происходить как в силу природных причин, так и в результате деятельности человека. Экологическое значение имеют такие критерии, как: количество, качество вод и их пространственно-временное распределение.

Основным методическим подходом к выявлению причин и рассмотрению гидрогенной динамики наземных экосистем является анализ причинно-следственных экологических связей в системе: действующий фактор (природный или антропогенный) → трансформация водного фактора в результате совокупного действия климатического и какого-либо вида хозяйственной деятельности →



Рис. 1. Методический подход к выявлению причин динамики экосистем [50 с изменениями]

процессы изменения функционирования биоты из-за изменения водного фактора → формирование негативных явлений или экологических проблем (рис. 1).

В предложенном подходе учитываются природные и антропогенные факторы (агенты) и их совместное действие. Их наложение может приводить как к усилению совместного действия на экосистемы и агроценозы (если воздействия направлены в одну сторону), так и к ослаблению (если воздействия разнонаправленные). Экологические последствия для экосистем объединены в группы по условиям возникновения: климатические, богарные, ирригационные, водохранилищные и урболандшафтные. Каждая группа имеет свои особенности проявления, масштабы и значимость.

Современный гидроморфизм и его индикаторы. Хозяйственная деятельность человека и современные флуктуации климата [9, 20, 34, 36, 37, 38, 23, 24, 33] стали причиной широкомасштабного изменения водного режима территорий и, как следствие, гидрогенной трансформации структуры, функционирования и компонентного состава не только гидроморфных, но и автоморфных ландшафтов. Это явление гидрогенной трансформации ландшафтов получило название «неогидроморфизм» или «современный гидроморфизм» [43, 50, 45]. Развитие современного гидроморфизма приняло столь широкие масштабы, что некоторыми исследователями оценивается

как национальное бедствие для нашей страны «...поскольку засоление и деградация распространяются на многие миллионы гектар ценнейших черноземных и других плодородных почв» [14; с. 25]. К настоящему времени явлением переувлажнения и подтопления на юге России охвачено около 9 млн га, в том числе 5 млн га сельскохозяйственных угодий [11]. Для изучения и выявления развития в ландшафтах современного гидроморфизма была разработана система критерииов и показателей (табл. 1).

Эта система была предложена для изучения развития гидроморфизма на побережьях водохранилищ [50, 51, 44] для установления глубины трансформации природных комплексов при разных видах воздействия водохранилища – затопления, подтопления. С этой целью среди критериев используются факторы (заливание и подтопление) и их показатели (критические значения). Среди биологических показателей используются компоненты экосистем (почвы, растительность, животное население). Некоторые из них (почвы) можно отнести к категории консервативных, их изменение происходит медленно и отражает тренды процессов трансформации водного фактора, в то время как растительность реагирует активно и непосредственно на флуктуационные изменения.

Методы оценки современного гидроморфизма и гидрогенных изменений в экосистемах. В последние годы (2012–17) для коллектива лаборатории основной задачей стала разработка оценочных диагностических показателей и критериев динамики экосистем для основных живых (растительных и животных), неживых (климатических, гидрологических) и условно живых (почвенных) её компонентов в условиях изменения водного режима территории при совокупном воздействии естественных и антропогенных гидрогенных факторов. В результате выполнения исследований и работе по Госконтракту с Министерством экологии и охраны окружающей среды РФ (2012–14) были определены и разработаны оценочные показатели и критерии как для живых так и для неживых компонентов экосистем.

Климатические изменения, влияющие на наземные экосистемы предлагается оценивать на основании динамического географического показателя – Относительного коэффициента изменений (ОКИ) основных климатических характеристик (ОКИ осадков и ОКИ тем-

пературы воздуха), который представляет собой отношение модуля изменения трендовых значений температуры (или осадков) за многолетний период (с момента открытия станции) к модулю амплитуды колебания фактических (измеренных) значений этого параметра в многолетнем аспекте [34, 36, 37]. При установлении наличия климатических изменений, способных повлиять на наземные экосистемы, совокупное воздействие изменений осадков и температуры воздуха (влажностно-температурного режима) предлагается оценивать по Индексу засушливости Педя 1 (ИПедя1) [58, 59, 34, 36, 37], который рассматривает аномалии температуры и осадков тренда по отношению к базовому периоду (1961–90 гг.) и его модифицированному варианту Педя 2 (ИПедя2) [34, 36, 37], который оценивает отклонение от среднего уровня средней температуры воздуха и суммы осадков за весь многолетний период наблюдений, с момента открытия станции.

Гидрологические (естественные) изменения под влиянием изменения климата, способные повлиять на наземные экосистемы также предлагается оценивать по Относительному коэффициенту изменений (ОКИ) основных гидрологических характеристик (ОКИ средних, ОКИ максимальных и ОКИ минимальных расходов и уровней воды в реках) за многолетний период, по такому же принципу расчёта как и для основных климатических характеристик [33, 34, 36, 37], т.е. – как отношение модуля изменения трендовых значений уровней и расходов воды за многолетний период к модулю амплитуды колебания фактических (измеренных) значений этих параметров в многолетнем аспекте. Гидротехнические (антропогенные) изменения предлагается оценивать по изменению (как правило, по сокращению) частоты и высоты заливания пойменных территорий в нижнем бьефе, а также по высоте и длительности подтопления территорий в верхнем бьефе [32; 38; 48, 44, 90, 92].

Оценка изменения почв экосистемы под воздействием водного режима территории (т.е. при совокупном воздействии естественных и антропогенных гидрогенных факторов) предлагается оценивать по степени и мощности оглеения (т.е. величине оглеенного горизонта в см и количества самих оглеенных горизонтов, а также по соотношению в % оглеения и ожелезнения по фону в оглеенных

горизонтах) и глубине залегания оглеенных горизонтов в почвах [21, 23, 24, 44, 52].

Нарушение экосистем предлагается разделять по типу и степени. На основании наличия или отсутствия климатических (естественных) изменений, а также гидрологических естественных или гидрологических антропогенных (гидротехнических) изменений и их совокупностей, можно выделять экосистемы разных типов нарушений: естественно нарушенные экосистемы (при естественных климатических и гидрологических нарушениях и их совместном влиянии), антропогенно нарушенные экосистемы (экосистемы нарушенные в результате гидротехнического антропогенного воздействия), смешанно нарушенные экосистемы (при совокупном воздействии естественных и антропогенных нарушений). Для каждого типа нарушенности экосистем выделяются три степени нарушений: слабая, средняя, сильная [38].

*Таблица 1*

**Индикаторы гидроморфизма: критерии и показатели [44, 52 с изменениями]**

№	Критерии	Показатели
1	Изменение радиационного индекса сухости (по соотношению тепла и влаги М.И. Будыко [5])	тундра – 0,5, лесная зона – от 0,5 до 1, степная – от 1 до 2, полупустынная >2, пустынная >3
2	Изменение атмосферного увлажнения (по Г.Т. Селянинову [65] ( $\Gamma\text{TK}=10P/\Sigma T$ , где $\Sigma T$ – сумма активных температур воздуха за период со средней суточной температурой выше $10^\circ\text{C}$ , где $P$ – осадки за тот же период, мм)	$\Gamma\text{TK}>1$ – гумидное, $\Gamma\text{TK}=1<0,5$ – субаридное, $\Gamma\text{TK}<0,5$ – аридное
3	Заливание, длительность и частота	слабое – от 10 до 15 дней, не ежегодное, среднее – 16–40 дней, ежегодное, сильное – более 40 дней, ежегодное
4	Подтопление по глубине залегания ГВ	сильное – на глубине 0,3–1,0 м, умеренное – на глубине 1,1–2,4 м слабое – на глубине от 2,5 до 5,0 м
5	Уровень грунтовых вод, развитие гидроморфных процессов	гидроморфный режим – 0–1,5 м, полугидроморфный режим – 1,5 (3) м, автоморфный режим >3 м

*Продолжение таблицы 1*

№	Критерии	Показатели
6	Проявление в почвенном профиле	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенная мощность гумусового горизонта (A+B): для луговато- и луговых почв – более 130 см, для влажно-луговых – более 100 см;</li> <li>– признаки современных окислительно-восстановительных процессов в виде гидроокисных пленок железа (окристовых пятен), сизоватости, включения марганцево-железистых новообразований: слабое проявление лугового процесса – от 1 до 2 м, активный луговой процесс (под гумусовым горизонтом) – от 50 до 80 см;</li> <li>– признаки глеевого процесса;</li> <li>– глубина наличия первичного и вторичного гипса (для степной зоны), который свидетельствует об уровне поднятия/опускания капиллярной каймы ГВ;</li> <li>– присутствие карбонатной плесени или размытых палевых пятен белоглазки (<math>\text{CaCO}_3</math>)</li> </ul>
7	Изменение в растительности	<ul style="list-style-type: none"> <li>– смена экологического типа растительности на основе представленности (% соотношения) видов разных экологических групп по отношению к водному фактору (гигрофиты, гидрофиты, мезофиты, ксерофиты), доминированию, типу водного питания (фреатофиты, трихогидрофиты, омброФиты) и засолению почв (мезофиты, мезогалофиты, галофиты);</li> <li>– доминирование или присутствие видов-индикаторов изменений водного режима (подтопления и затопления)</li> </ul>
8	Изменение в населении животных	численность, плотность популяций индикаторных групп видов животных (рассчитывается для конкретных регионов)

Оценку нарушений от естественных (климатических) и антропогенных (гидротехнических) причин одной из основных живых компонент экосистем – растительности (являющейся эдификатором наземной экосистемы) предлагается проводить на основании совокупности биологических показателей [21, 40, 35].

Основные биологические показатели предлагается разделить на две совокупности – динамические и стабильные (табл. 2).

К динамической группе биологических показателей относятся показатели с постоянно изменяющимися (как минимум ежегодно) значениями. Они отражают направления и процессы в изменении увлажненности (обводненности) территории как от антропогенного, так и от естественного (климатического) воздействия. К динами-

Таблица 2

**Степени нарушений околоводных экосистем (долинных и пойменных) в результате изменения обводненности территории при зарегулировании и/или климатических изменениях по основным биологическим критериям и показателям [40]**

Степень нарушения экосистем → Эколог.-биологические показатели↓	1. Ненарушенное (естественное)	2. Слабо нарушенное	3. Средне нарушенное	4. Сильно нарушенное	5. Полная деградация
<b>I. Стабильные, или постоянные биологические показатели, т.е. обычно изменяющиеся постепенно и индицирующие, в основном, региональные антропогенные (от I C) нарушения</b>					
а) изменение структурной организации растительных сообществ: по наличию и качеству измениений в ярусной структуре сообщества	5–6 ярусов (для леса) 3–4 яруса (для луга)	4 яруса (для леса) 2 (для луга)	3 (для леса) 2 (для луга)	2 (для леса) 1 (для луга)	1 (для леса) 1 (для луга)
б) наличие* и количественная** композиция в составе растительных сообществ видов растений – индикаторов изменения волного режима территории (по присутствию/отсутствию и общему количеству видов-индикаторов)	Полностью отсутствуют или встречаются единично до 2–х видов*	В составе сообщества 2 вида индикатора*	В составе сообщества 2–3 вида-индикатора*	В составе сообщества более 3–х видов* индикаторов*	В составе сообщества, только виды-индикаторы*
в) качественное и количественное проявление видов растений – индикаторов изменения водного режима территории (по общему и прективному покрытию видов-индикаторов);	В малом обилии (sol-Un)**	В среднем обилии (sp-sp gr)**	В малом (один) и/или большом (другой) обилии**	В среднем и большом обилии (sp-cop3)**	В любом обилии**

*Продолжение таблицы 2*

Степень нарушения экосистем → Эколог.-биологические показатели↓	1. Ненарушенное (естественное)	2. Слабо нарушенное	3. Средне нарушенное	4. Сильно нарушенное	5. Полная деградация
1) изменение кормовой ценности луговых сообществ (по количественным показателям участия сорнотравья в составе сообществ)	Изменений нет (участие колючего сорнотравья до 3% от проективного покрытия)	Слабое ухудшение (участие колючего сорнотравья 3–7% от проективного покрытия)	Падение кормовой ценности на 20–50%	Сокращение продуктивности в 1,5–2 раза и кормовой ценности на 50–70%	Сокращение продуктивности в 3–4 раза; полное падение кормовой ценности
2. Динамические эколого-биологические показатели, изменяющиеся ежегодно и индицирующие процессы изменения увлажненности территории не только от регионального антропогенного воздействия (от ГС), но и от регионального естественного (климатического)					
д) изменение видового разнообразия растительных сообществ, т.е. количественные* и качественные** изменения показателей общего видового разнообразия за многолетний период	Изменений нет*	Изменения слабые, сокращение состава <5%*	Сокращение состава сообщества на 5–25%*	Сокращение состава сообщества в 1,5–1,9 раза*	Сокращение состава сообщества в 2–4 раза*
e) флюктуационная изменчивость растительных сообществ, т.е. соотношения количественных показателей: по присутствию постоянных видов растений от ежегодного* и многолетнего** (за 2–3 года) флористического списка	Менее 70%*	Меньше или равно 70%*	Равно или более 70%*	Более 70% – менее 80%*	80–100%*
	Меньше 50%**	Меньше или равно 50%**	Равно или более 50%**	Больше 50% – менее 60%**	Больше 60%**

ческим показателям относятся: 1) изменение видового разнообразия растительных сообществ за многолетний период и 2) их ежегодная флюктуационная изменчивость. К стабильной совокупности биологических показателей относятся показатели обычно изменяющиеся во времени не сразу, а за достаточно длительный период (от 10 лет и более) и обладающие более или менее постоянными значениями, изменяющимися не ежегодно. К стабильной группе биологических показателей относятся: 1) изменение структурной организации растительных сообществ (количество и качество ярусов); 2) наличие и количественная композиция в составе растительных сообществ видов растений – индикаторов изменения водного режима территории; 3) качественное и количественное проявление видов растений – индикаторов изменения водного режима территории; 4) изменение кормовой ценности луговых сообществ (по сорнотравью) [40, 35].

Таким образом, был разработан «Метод оценки нарушений в околоводных экосистемах по биологическим критериям и показателям при изменении обводнённости территорий (от естественных климатических и антропогенных гидротехнических воздействий)», который достоверно диагностирует изменения и нарушения в экосистемах.

Оценка нарушений одного из живых компонентов экосистем ( наземных позвоночных) при изменении водного режима территории под влиянием природных и антропогенных факторов предлагаются проводить по разработанному оригинальному индексу «сравнительной оценки обобщённых показателей богатства животного населения (которое включает одновременную оценку видового разнообразия и численности)»: обобщённый индекс разнообразия и численности – Ир= $NxP_{max}+S$ , где  $N$  – количество видов, отмеченных в пределах биотопа;  $P_{max}$  – максимально возможное обилие вида (которое равно пяти);  $S$  – сумма балльных оценок обилия всех видов, отмеченных в пределах биотопа. Данный индекс (Ир) позволяет паритетно учитывать как видовое богатство, так и обилие каждого вида наземных позвоночных на различных территориях, подверженных изменениям в настоящее время или в перспективе. На основе распределения этого индекса для зоны влияния проектируемого гидроузла можно строить соответствующие карты [61, 62, 63, 13, 3].

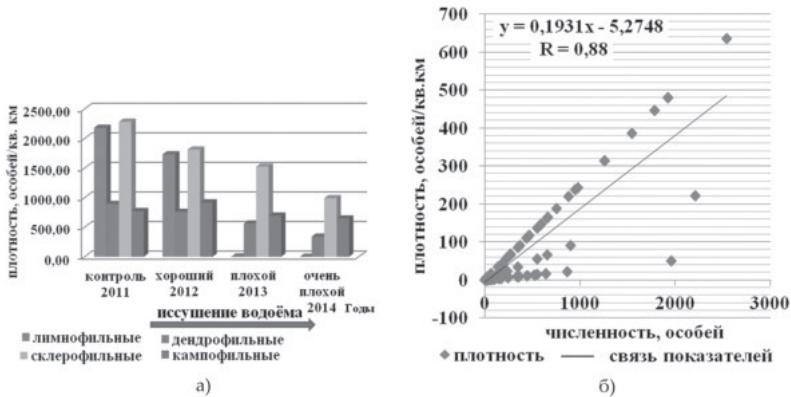


Рис. 2. Изменение плотности видов разных экологических групп а) и связь показателей численности и плотности видов б) птиц в орнитокомплексах.

Оценку нарушений другого живого компонента экосистем – орнитокомплексов – при изменении водного режима территории под влиянием природных и антропогенных факторов предлагается проводить на основе показателей численности и плотности видов орнитокомплекса; показатель плотности видов в сообществе наилучшим образом способен отображать динамику состояния орнитокомплекса (рис. 2) [70, 71].

Основным оценочным индикационным показателем быстрой трансформации болотных экосистем торфяников при их обводнении и/или осушении является изменение структуры орнитокомплексов (на основе изменения состава и численности видов птиц), а оценочными критериями изменения этих экосистем служит их сравнительная качественно-количественная характеристика [12, 7]. Основными показателями и критериями длительно протекающих трансформаций болотного комплекса в целом под влиянием антропогенных и природных факторов коллективом авторов, в составе которого участвуют и сотрудники ИВП РАН [69] определены: изменения соотношения пыльцы основных компонентов в спектрах спорово-пыльцевой диаграммы торфяного монолита, особенности видовой структуры раковинных амеб в торфяном монолите, степень содержание микрочастиц угля в торфяном монолите, реконструированные значения уровня залегания болотных вод (УБВ, см), а также степени гумификации торфа. В процесса трансформации берего-

вых экосистем основным оценочным показателем можно считать скорость разрушения берега – скорость продвижения бровки коренного берега [77, 78].

Были также разработаны методы, позволяющие на основании комплексной оценки нарушений нескольких компонентов экосистем оценить степень их трансформации в результате антропогенного – гидротехнического (по изменению в поверхностных и подземных водах, почвах и растительности [44, 52]) или суммарного – антропогенного и естественного (климатического) воздействия (по изменению основных климатических и гидрологических характеристик, почв, растительности [29, 31, 35]).

### **Результаты исследований и обсуждение**

Интенсивная хозяйственная деятельность на фоне современных изменений климата в лесостепных и степных районах на юге РФ обусловила возникновение переувлажнения на обширных территориях, в связи с чем в лаборатории ведется изучение развития современного гидроморфизма. Результаты проведенных исследований на Юге России позволили выявить механизмы, тенденции и скорость гидрогенных трансформаций природной среды в условиях развития водохозяйственной деятельности и изменений климата.

Водные экологические проблемы в условиях богарных агроландшаftов. В степных районах на юге РФ локальное переувлажнение и часто сопутствующее ему засоление почв становятся причиной деградации высокопродуктивных чернозёмов и вывода земель из сельскохозяйственного оборота, снижает эффективность хозяйственной деятельности человека в агроландшафте. На переувлажнённых землях формируются вторично гидроморфные комплексы, не имеющие аналогов в естественных степных биомах. Каждый из участков локального переувлажнения имеет небольшую площадь проявления (в среднем 200 м<sup>2</sup>) но на территории административного района они суммарно могут составить значительные площади и нанести существенный урон общему урожаю.

Явление современного локального переувлажнения земель характерно для плакоров и склонов лесостепных и степных районов и описано в Молдавии, на Украине, Центрально-Чернозёмной области РФ, Восточном Донбассе, Предкавказье. Все исследователи

этого явления едины во мнении, что оно – результат сочетания природных предпосылок (климатические флуктуации, состав поверхностных отложений, рельеф) и хозяйственной деятельности человека, направленной на задержание влаги в почве.

Распашка территорий, использование однолетних культур и агротехнические приёмы, направленные на перевод поверхностного стока во внутрипочвенный – предпосылки повышения грунтовых вод или появления верховодки. Эти процессы усиливаются при соответствующих изменениях климата. По наблюдениям авторов в 1997–2006 гг. в пределах юго-восточной окраины Донецкого кряжа (Ростовская область), основываясь на данных, полученных на 58 обследованных участках очагов локального переувлажнения на плакорах, выявлена зависимость изменения площади переувлажнения земель от отклонения осадков конкретного года от среднемноголетней суммы за период с ноября по май. Так, при обеспеченности осадков Р>75% наблюдается максимум площадей переувлажнённых земель, при Р<25% – минимум. Устойчивая тенденция роста площадей, обусловленных переувлажнением в отдельные периоды создаёт проблемную ситуацию [8, 50].

Исследования показали, что переувлажнённые участки имеют сложную структуру, определяемую количеством влаги и засолением почв (рис. 3).

В центре, как правило, располагаются участки (рис. 3, №1) с постоянным сильным переувлажнением, они выделяются по высоким (до 2,5–3 м) зарослям тростника. Из-за переувлажнения агротехническая обработка почвы производится крайне редко или прекращена полностью. Они окружены участком (рис. 3, №2) с периодическим высоким и стабильно средним переувлажнением, занятым пырейными или вейниковыми сообществами, они длительное время агротехнически не обрабатываются. Далее следует территория (рис. 3, №3) со средним переувлажнением, периодически сокращающимся, из-за чего эпизодически распахивается и занята сорнотравьем (распашки текущего года нет). К предыдущему массиву примыкает территория (рис. 3, №4) с регулярно пульсирующим переувлажнением от сильного к среднему (в зависимости от водности года), с разреженными экземплярами тростника или пырея в посевах по распашке этого года. Участки со слабым переувлажнением (рис. 3, №5) явля-

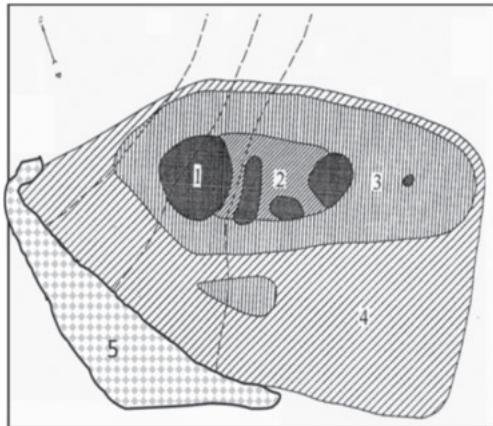


Рис. 3. Пространственная структура растительности на переувлажнённом участке в агроценозе: 1 – сомкнутые заросли тростника южного; 2 – заросли пырея ползучего; 3 – сорная растительность на распашке; 4 – тростник по распашке этого года; 5 – распаханный участок без всходов культурных растений [8]

ются переходом к агроценозам, на них наряду с культурными растениями развито сорнотравье, культурные растения угнетены.

Засоление почв может изменяться от слабого (0–0,025%) до среднего (0,25–0,50%). В составе солей преобладают сульфаты, но при возрастании засоления увеличивается содержание ионов хлора. Источниками засоления являются соленосные скифские глины, содержащие легкорастворимые соли в больших количествах и локальные выходы грунтовых вод, приближающиеся к поверхности или имеющие выходы на поверхность на склонах.

С точки зрения оценки связей растительности с характером увлажнения почв наиболее показательным является почвенный слой 0–50 см, поскольку 95% корней концентрируется на этой глубине. Весной наибольшие запасы влаги, до 280 мм, находятся в зарослях тростника, в остальных сообществах – около 200 мм. Сезонный ход запасов влаги по профилю наиболее выражен в слое 0–50 см и стягивается с глубиной. В мае запасы влаги по всем точкам профиля превышают августовские показатели на 100 мм в нижних слоях почвы и на 200 мм в верхних.

Нераспахиваемые участки сильного и среднего переувлажнения со временем застают корневищными злаками, которые целесообразно оставлять в залежном состоянии и использовать в качестве

сенокосов. На участках слабого переувлажнения, периодически распахиваемых, происходит концентрация сорных видов. Для того чтобы снизить массовое скопление сорняков, желательно такие участки также не подвергать распашке и перевести их в другой вид землепользования – сенокосы (возможно также засевание кормовыми злаками такими, как костры и пыреи) и пастбища.

В итоге проведённых исследований получены фундаментальные результаты: установлены закономерности формирования растительности на вторично гидроморфных биотопах антропогенно трансформированного степного биома в условиях саморегуляции его водного режима на ландшафтном уровне и даны предложения по природопользованию с целью ослабления развития этого процесса. Впервые явление вторичного гидроморфизма на плакорах степной зоны рассмотрено как геоэкологическая проблема; выполнена типология вторично гидроморфных природных комплексов (ПТК) и дана им комплексная характеристика на основе экспериментальных данных; выявлено флористическое и фитоценотическое разнообразие, продуктивность растительности вторично гидроморфных ПТК. Сделано заключение о том, что видовой состав растительности вторично гидроморфных биотопов не поддерживает ботаническое разнообразие степной зоны, а преобладание сорных видов создаёт угрозу биологического загрязнения агроландшафтов. Установлены виды – индикаторы динамических категорий солевого состава почв; даны предложения по природопользованию в условиях проявления вторичного гидроморфизма и путям использования этих ПТК.

Орошаемое земледелие и сопутствующие водные экологические проблемы. Вывод земель из сельскохозяйственного оборота из-за подтопления и засоления почв до сих пор остаётся основной проблемой в орошаемом земледелии. На Европейской части РФ существуют природные предпосылки к развитию негативных процессов при орошении: равнинный рельеф, слабая дренированность, лессовидные, глинистые засоленные отложения морского генезиса. Антропогенная причина – избыточные нормы полива, приводящие к подъёму уровня грунтовых вод, подтоплению прилегающих земель и засолению почв.

Региональные водно-экологические проблемы в условиях развития орошаемого земледелия слабо проработаны в плане их даль-

Масштаб 1: 6 000 000



Рис. 4. Опасность переувлажнения и засоления земель под влиянием изменения климата и гидромелиорации [49]

нейшего развития и рекомендаций в связи с прогнозируемыми изменениями климата. Выполненное картографическое исследование в лаборатории динамики наземных экосистем ИВП РАН [49] позволило выявить территории, имеющие тенденции в направлении развития негативных процессов – подтопления и засоления почв по состоянию на 1982–2006 гг. (рис. 4, 5). На их основании для всех субъектов Южного федерального округа рассчитан процент



**Авторы карты:**  
Н.М. Новикова,  
Ж.В. Кузьмина,  
Н.А. Шумова,  
А.В. Кутузов

Рис. 5. Опасность подтопления земель под влиянием гидромелиорации [49]

площадей, с развитием этих явлений. На основании существующих тенденций изменения климатических параметров составлена карта опасности дальнейшего развития существующих негативных про-

цессов под их влиянием в условиях возрастания климатической влагообеспеченности.

Прогнозная оценка существующей тенденции изменения гидротермических условий на территории Южного Федерального округа выявила для большей её части слабую, а для ряда субъектов федерации (Ростовской, Астраханской областей, Ставропольского края) – среднюю степень опасности (рис. 4). Развитие современного гидроморфизма из-за подтопления земель в результате гидромелиорации в наибольшей степени затронула территорию Ставропольского края, Ростовской и Волгоградской областей, республики Калмыкия (рис. 5).

Рассмотрение широкомасштабной трансформации водного режима крупного региона на юге Европейской части РФ в условиях современной флюктуации климата и водохозяйственной деятельности человека как факторов изменения биоразнообразия было выполнено впервые.

Показано, что для степной зоны на фоне превращения её в агроландшафт, развитие современного гидроморфизма становится важным фактором расселения аллохтонных и автохтонных организмов и формирования биотопических структур, создающих новые незанятые экологические ниши, в которых возникают условия для создания сообществ, сочетающих в себе организмы различной экологии. В то же время новая среда обеспечивает сохранение редких и охраняемых видов.

Интенсивная хозяйственная деятельность на фоне современных изменений климата в лесостепных и степных районах на юге РФ обусловила возникновение переувлажнения на обширных территориях. Исходно гидроморфные ландшафты трансформировались в гидроморфные. Развитие засоления, сопутствующего переувлажнению, обусловило потерю плодородия и вывод этих земель из сельскохозяйственного оборота. Это составляет суть современных водных экологических проблем в этом регионе. Несмотря на различные ландшафтные условия и причины, провоцирующие развитие гидроморфных природных комплексов, процессы неспецифичны – они развиваются по природному типу.

Исследование формирования составляющих водного баланса агроэкосистем лесостепной и степной зон. В основу изучения зако-

номерностей формирования составляющих водного баланса агро-экосистем положен подход, разработанный в рамках географического и прикладного направлений учения о почвенных водах и их ресурсах, позволивший принципиально по-новому подойти к оценке водообеспеченности сельскохозяйственных культур, учитывая их потребность в воде на протяжении роста и развития, а также учитывая закономерности формирования почвенно-гидрологических условий [74, 75]. Использование данного подхода позволило оценить ресурсы почвенных вод и водообеспеченность агроценозов лесостепной и степной зон как при применении традиционной агротехники, так и при проведении различных мероприятий «сухого земледелия», направленных на повышение водообеспеченности сельскохозяйственных культур, а также выявить резервы возможного повышения их водообеспеченности.

Исследования показали, что лесостепная и степная зоны подвержены систематическим засухам, которые в различных частях этой территории отличаются интенсивностью и повторяемостью. Потребность в воде ранних яровых культур в средний по водности год обеспечивается на 80% на северо-западе региона, снижаясь до 30% к низовьям Волги. При этом можно отметить, что ресурсы почвенных вод расходуются крайне непродуктивно: доля транспирации в суммарном испарении ранних яровых культур составляет 30–40% [73, 76].

В результате применения наиболее известных приемов агрогидрологического регулирования почвенных вод – задержание стока талых вод на сельскохозяйственных полях, зяблевая пахота, применение черных паров – происходит увеличение весенних запасов воды в почве, что в свою очередь приводит к увеличению транспирации. Расчеты показали, что в случае посева ранних яровых культур 65% от приращения весенних запасов воды в почве, полученного за счет агрогидрологических мероприятий, идет на транспирацию, а 35% расходуется на испарение воды почвой. В результате проведения мероприятий по задержанию стока талых вод на сельскохозяйственных полях, зяблевая пахота и парование полей могут привести к увеличению водообеспеченности посевов ранних яровых культур на юге Русской равнины на 10–20%. Это позволяет в средний по водности год избежать засух на северо-западе лесостепной зоны. При применении мульчирования почвы растительными остатками

на значительной части лесостепной зоны в средний по водности год возможно полное прекращение засух, а на остальной части рассматриваемой территории водообеспеченность посевов может возрасти на 60% [75].

Изучение и мониторинг трансформации аридных экосистем при гидротехническом строительстве и их реабилитация в современных условиях проводились в Приаралье и сопредельных аридных территориях Средней и Центральной Азии [67, 68, 66, 42, 56, 57, 90, 92, 47, 25, 26, 32, 82, 87]. Они посвящены изучению экологических последствий крупнорегиональных водохозяйственных преобразований, в которых соединились сопряженные проблемы нерационального землепользования и предельно допустимых объёмов изъятия стока. Как следствие – из сельскохозяйственного оборота выведены по причине засоления самые лучшие земли, опустыниванию подвержены уникальные экосистемы тугаев дельтовых равнин [67, 68, 66, 82, 87, 91, 25, 32, 37] утеряно высокопродуктивное солоноватоводное озеро-море.

Тугай – это особый реликтовый тип растительности Средней Азии, сохранивший былые черты третичной флоры (фото 1–2). Современные тугаи – это пойменные древесно-кустарниковые и травяные сообщества, распространённые в поймах рек Передней, Средней и Центральной Азии, где в настоящее время повсеместно происходит неуклонное сокращение их ареала распространения. Основная часть (до 95% площади) современных тугаев относится к деградированным экосистемам, которые характеризуются упрощенной структурой сообществ, пониженным видовым разнообразием, слабыми разногодичными изменениями состава сообществ и пониженной продуктивностью (фото 1).

Основными причинами повсеместной деградации тугаев является региональное косвенное антропогенное воздействие, связанное с зарегулированием стока рек (рис. 6), а также естественные климатические изменения. Сопутствующими факторами деградации является также локальное прямое антропогенное воздействие: вырубки и перевыпас.

Все эти факторы разными способами приводят к однотипным последствиям: деградации аллювиальных тугайных почв и образованию на их месте солончаков луговых, типичных или остаточных



Фото 1. Полная смена турангового тугая в результате засоления почв на солончаковую погибающую растительность (*Ass. Halostachys belangeriana-Alhagi pseudalhagi*) в заповеднике Бадай-Тугай, сентябрь 2010 г. [32]



Фото 2. Разреженный деградирующий гребенщиково-туранговый тугай (*Ass. Populus aritana-Tamarix hispida*) в заповеднике Бадай-Тугай, сентябрь 2009 г. [32]

средней и сильной степени засоления, часто и глубокозасолённых, вплоть до глубины 3 м (фото 2).

Нашиими многолетними исследованиями установлено, что для искусственного лесовосстановления тугаев необходимо применять специальные методики восстановления сообществ в зависимости от степени и характера засоления деградированных почв и возможностей обводнения (т.е. использование различных по качеству вод – речных или коллекторно-дренажных, а также применение различного режима увлажнения территорий: от минимального редкого первоначального полива при недостатке воды, до ежегодного искусственного заливания). При лимитированном использовании коллекторно-дренажных вод слабой и средней степени засоления возможно создание только галофитных вариантов тугаев. В тоже время

при использовании речных вод в достаточном количестве возможно восстановление типичных тугайных экосистем даже на сильно- и глубокозасоленных (до 2,5 м) почвах [32].

Катастрофическое развитие Аральского кризиса [90, 92] привело летом 2009 г. к практически полному высыханию акватории Арала [27]. Возникла проблема предотвращения пыльных бурь и выноса солей с обсохшего дна моря, решение которой тесно связано с рекультивацией солончаков путём фитомелиорации [27, 28, 30]. Работы по фитомелиорации автоморфных солончаков морского и пойменного происхождения проводились сотрудниками лаборатории в Южном Приаралье в 2002–11 гг. совместно с Институтом биоэкологии Академии наук Республики Узбекистан при финансовой поддержке Университета им. Бен-Гуриона (Израиль), фонда USAID (США) и Европейской комиссии [87, 27, 28, 30, 86]. Проводимые опытные работы были признаны вполне успешными, однако приживаемость, дальнейшее выживание галофитных видов растений и формирование жизнеспособных экосистем на обсохшем дне Арала существенно зависели от первоначального засоления почвогрунтов, от засоления и динамики падения грунтовых вод, а также от сезон-

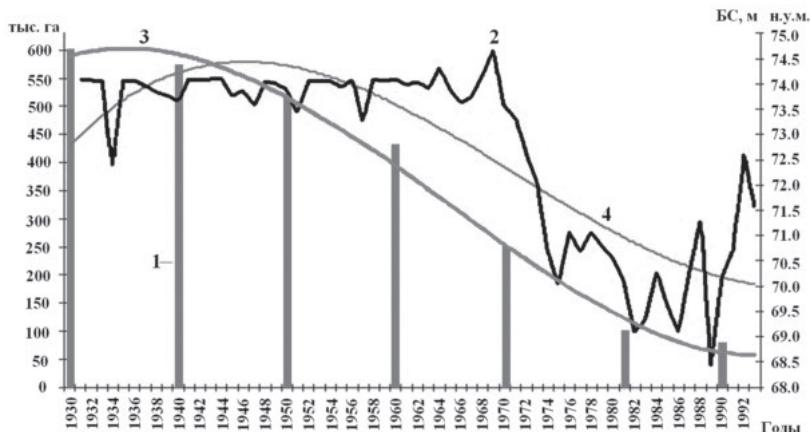


Рис. 6. Зависимость сокращения тугайных площадей от падения уровня воды в нижнем течении реки Амударья (1890–1993 гг.). Условные обозначения: 1 – площадь тугаев в тыс. га; 2 – среднегодовой уровень воды в низовьях Амудары (БС, м н.у.м.); 3 и 4 – полиномиальные кривые сокращения площади тугаев (3) и уровня воды в реке Амударье (4) [32]



Рис. 7. Модель динамики тугайных и солончаковых экосистем (формаций растительности) в дельте Амудары [27, 91, 92]

ных изменений в засоленности почв по профилю, что связано с климатическими флуктуациями.

Оценка воздействия климатических компонент экосистем для региона Приаралья показал, что основная тенденция изменений здесь в настоящем и будущем – это значительно более тёплые и влажные зима и холодное полугодие [37]. Второй особенностью совокупных климатических изменений для данного регионе является очень сильное увеличение аридизации в основной период вегетации – весенне-летне-осенний и, особенно весной, что существенно ухудшит и без того сложные условия фитомелиорации или выращивания сельскохозяйственных культур. Выявленные тренды изменения климатических компонент негативно отразятся на естественных экосистемах и агроценозах региона Приаралья и сопредельных территорий Средней Азии. Для поддержания сельскохозяйственного производства здесь потребуется увеличение мелиоративного обводнения, поскольку будут формироваться больше засух в весенний, летний и осенний сезоны года. Без дополнительных усилий по обводнению сельскохозяйственных, пойменных и дельтовых территорий будет нарушена естественная модель динамики экосистем. Будут формироваться более пустынные ксерофитные, экстроксеро-

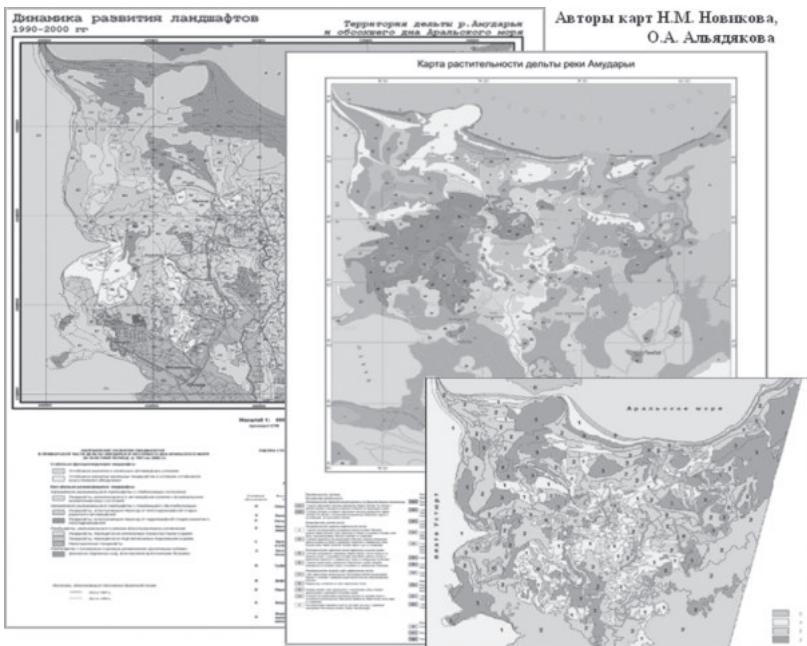


Рис. 8. Оценка и мониторинг трансформации природных экосистем в условиях экологического кризиса Аральского региона [89]

фитные и экстрагалофитные экосистемы (рис. 7), в то время как мезофитные, ксеромезофитные, пойменные и дельтовые на прежде слабо и среднезасолённых почвах подвергнутся полной необратимой редукции и опустыниванию [37, 91].

Для региона Аральского кризиса накоплена эколого-географическая информация; для Южного Приаралья разработана концепция мониторинга за состоянием экосистем и структура ГИС для наблюдения за нестабильными ландшафтами; создана серия карт эколого-географической тематики, разработана методика и оценочная карта изменений экосистем [55, 89, 91] (рис. 8).

Динамика экосистем и экологические проблемы создания гидротехнических сооружений и водохранилищ при них. Основными факторами и процессами вызывающими негативные изменения пойменных экосистем при гумидном потеплении климата, а также в результате воздействия любых гидротехнических сооружений являются: стабилизация режима УГВ в поймах (из-за выравнивания

УВ в реках), климатическое подтопление (в результате увеличения выпадения атмосферных осадков; изменение паводкового затопления (в основном сокращение), повышение (для низконапорных гидротехнических сооружений – НГС) или понижение (для среднена-порных – СГС и высоконапорных – ВГС) общей обводнённости поймы, изменение характера и интенсивности почвообразования (повышение или понижение оглеения и/или ожелезнения, увеличение засоления, появление отакыривания и др.). Эти процессы приводят к нарушению структурно-функциональной организации экосистем и развитию сукцессионных смен. Глубина и скорость трансформации экосистем зависит от интенсивности и продолжительности антропогенного воздействия или климатических изменений [31, 38, 39].

В результате исследований, проведенных в центральной (Германия) и восточной (РФ) Европе разработан алгоритм оценки влияния низконапорных гидротехнических сооружений (НГС) на наземные пойменные экосистемы [83, 84, 85, 19, 21] и апробирован на примере оценки воздействия низконапорных гидротехнических сооружений на динамику наземных экосистем зоны широколиственных лесов центральной и восточной Европы, а также зоны южной тайги в РФ [29, 30, 38].

Установлено, что при создании низконапорных гидротехнических сооружений происходят медленнотекущие (20–50 лет) изменения в цепи геэкологических связей, которые инициируются изменениями режима речного стока и режима уровня грунтовых вод. Изменение амплитуды колебания УГВ в пойме является ведущим процессом последующих изменений в пойме. Работы подразделяются на несколько этапов, включающих анализ как гидрологических и климатических изменений среды, так и нарушений в почвенном и растительном покровах: установлен список видов растений индикаторов зарегулирования НГС для зоны широколиственных лесов и южной тайги, на основе распространения которых разработан метод оценки опасности нарушений для экосистем под воздействием НГС и необходимости восстановительных мероприятий. Составлена «Прогнозная схема изменения растительности в поймах рек широколиственной зоны Восточной и Центральной Европы при изменении обводнённости территории», в которой для различных экологических

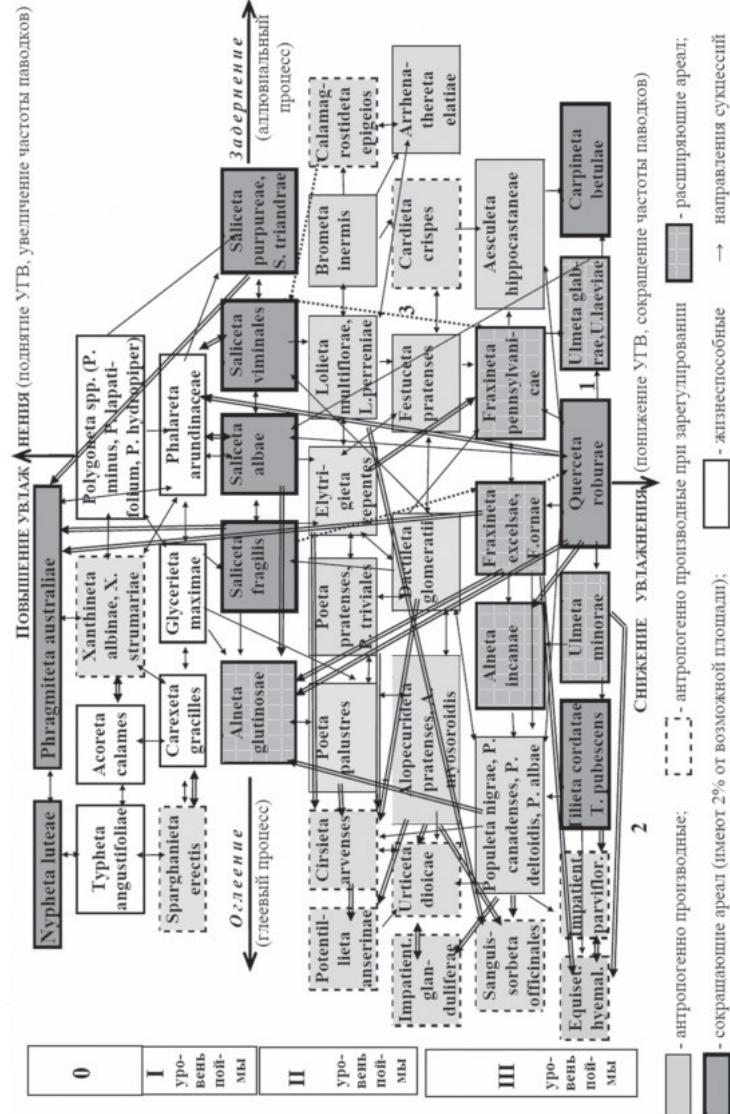


Рис. 9. Модель динамических связей и характера современного состояния экосистем (формаций растительности) пойменных местообитаний зоны широколиственных лесов Центральной и Восточной Европы. Пойменные уровни: 0 – постоянные или длительно затапливаемые территории (на небольшую глубину 0–0,5 м), I – низкая пойма, II – средняя пойма, III – верхняя пойма. Направление сукцессий: → – односторонние, ↔ – двунаправленные; 1 – естественные или «условно» естественные, 2 – антропогенные при зарегулировании НГС, 3 – антропогенные демутационные (восстановительные) при зарегулировании НГС [21]

уровней пойм прослежены стадии изменения естественных сообществ в результате антропогенного зарегулирования рек НГС. Создана «Динамическая модель формаций пойменных местообитаний зоны широколиственных лесов» (рис. 9) которая полностью отражает все возможные трансформации пойменных экосистем (направление и вид сукцессионных изменений как естественных, так и природных) в зависимости от поемного и дернового процессов (положения УТВ, режима затоплений, характера и степени ожелезнения и оглеения в почвах). Разработанная «Динамическая модель» даёт представления о тенденции ареалов пойменной растительности в настоящее время, возможность долгосрочного прогноза при изменениях дернового и поемного процессов, а также является основным макетом полного комплекса пойменных экосистем для зоны широколиственных лесов при восстановительных мероприятиях на нарушенных в результате зарегулирования пойменных территориях.

Для решения проблемы деградации пойменных экосистем уже находящихся под влиянием НГС разработаны мероприятия и экологические ограничения по управлению режимом речного стока.

Проблемы, обусловленные созданием водохранилищ, многочисленны. Для изучения «водохранилищного» гидроморфизма (переувеличения), одного из наиболее широко распространённых типов современного гидроморфизма на юге РФ, были проведены полевые исследования в различных ландшафтных условиях на побережьях Краснодарского, Цимлянского, Веселовского и Пролетарского водохранилищ. Исследования показали, что в зоне гидрологического воздействия (заливание и близко залегающие к поверхности грунтовые воды) наблюдается смена степной растительности на луговую, почвы формируются также луговые. В зоне гидрогеологического влияния, которое наиболее выражено на Веселовском водохранилище, вследствие подпора сильно засоленных грунтовых вод, создаваемого водохранилищем, широкое развитие получило засоление почв, вплоть до формирования мокрых солончаков, на расстоянии от 50 до 500 м от уреза воды в летний период. На Цимлянском водохранилище в условиях заливания распространены луговые и древесные сообщества – ивово-тополевые, ветловые, аморфово-ясеневые. На Веселовском и Пролетарском – тростниковые и лугово-солончаковые.

Зоны сработки водохранилища испытывают наиболее контрастные смены увлажнения, не имеющие аналогов в природе. Они ежегодно от 6 до 10 месяцев находятся под водой. Обследование Краснодарского водохранилища показало, что в период с июня по ноябрь отметки уровня воды опускаются на 4 м и постепенно выходят на дневную поверхность из-под воды всё новые участки дна водохранилища, лишенные почв и растительности [64].

Исследования показали, что на побережьях водохранилищ наибольшие трансформации биоты происходят при затоплении и подтоплении земель. Таким условиям на юге России удовлетворяют в наибольшей степени территории Ставропольского и Краснодарского краев, Ростовской и Астраханской областей, республики Калмыкия.

Установлены локальные закономерности формирования пространственной экологической структуры, ботанического и почвенного разнообразия в результате создания искусственных водоёмов: крупных водохранилищ (в Ростовской, Волгоградской и Саратовской областях), водных объектов Калмыкии [53]; прудов Воронежской области [46]. Выявлены особенности формирования орнитофауны на островах в средней части Волгоградского водохранилища [72].

В результате исследования экологических последствий для экосистем при создании горных водохранилищ были выделены и охарактеризованы основные временные этапы динамики животного населения; на основании закономерностей трансформации биоты, установленных на Зейском водохранилище, дан прогноз основных тенденций изменения природной среды и животного населения в зоне влияния созданного Бурейского водохранилища и проектируемого Нижнезейского (рис. 10, 11) [63]; разработана система экологического мониторинга Приамурья; разработана и предложена к внедрению схема ООПТ в бассейне реки Буреи; выполнена предварительная оценка экологического ущерба животному населению от создания Буреинского гидроузла [55, 60].

Прогноз основных тенденций изменений экосистем в зоне влияния Бурейского водохранилища, основанный на выявленных закономерностях при мониторинге Зейского водохранилища оказался очень близким к реальности и позволил обосновать систему ООПТ.

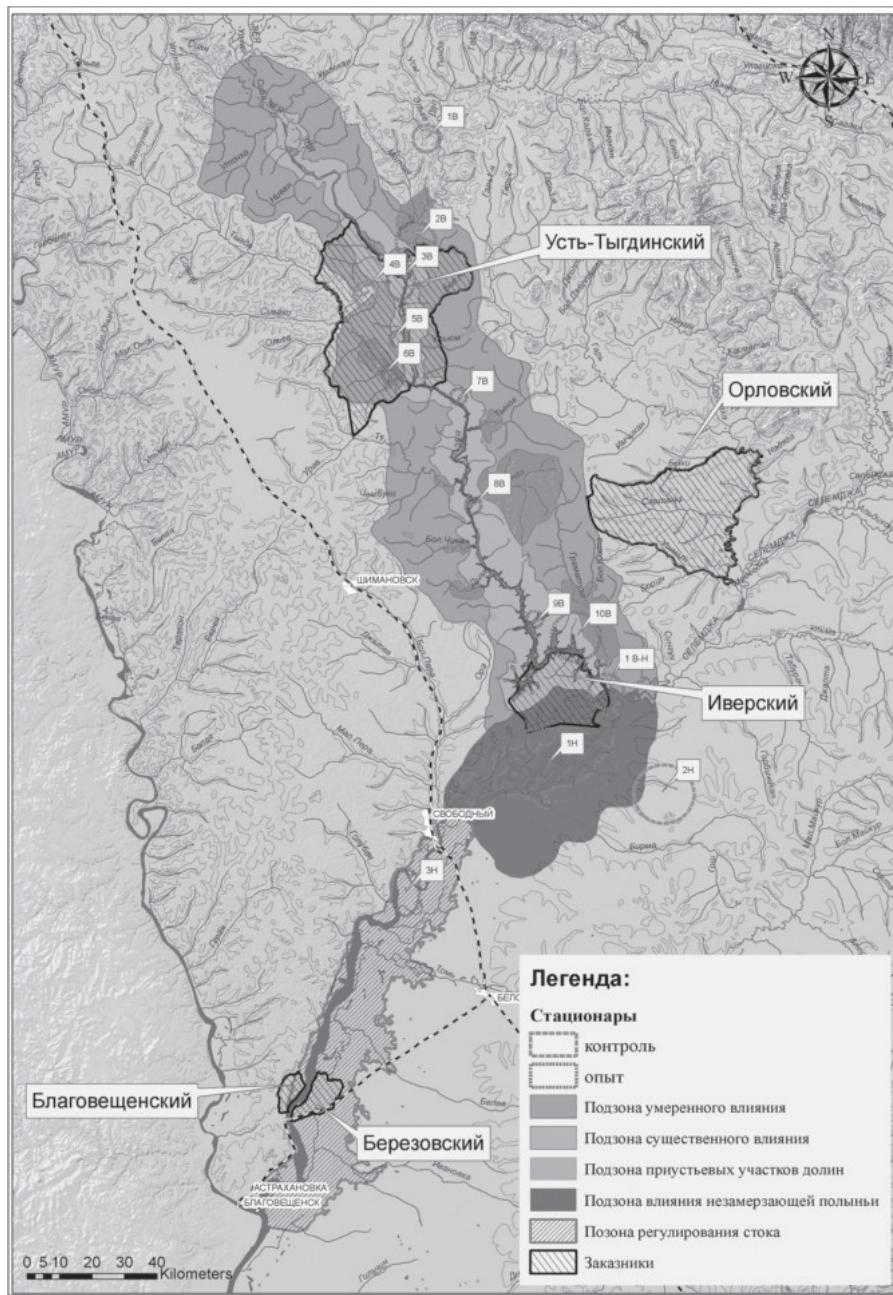


Рис. 10. Влияние на население наземных позвоночных проектируемого Нижнезейского водохранилища [63]

Разработка методов оценки и прогноза изменения экосистем. Сотрудниками лаборатории исследуются отдельные компоненты наземных экосистем (растительность, животное население, почвы, грунтовые и поверхностные воды) в зонах влияния горных и равнинных водохранилищ, а также в долинах рек Дальнего Востока, Центральной и Южной России, Центральной Европы, Центральной и Средней Азии с целью разработки оценочных показателей, методик и методов покомпонентной и результирующей оценки естественного (климатического) и антропогенного (гидротехнического) воздействия на наземные экосистемы.

В настоящее время Н.М. Новиковой с соавторами [52, 44] на основании совокупной оценки изменения нескольких компонентов экосистем (почв, растительности, грунтовых вод) разработана методика оценки гидрогенной трансформации природных комплексов побережий водохранилищ в связи с антропогенным гидротехническим воздействием.

Ж.В. Кузьминой с соавторами для пойменных, долинных и дельтовых экосистем разработан алгоритм оценки их трансформаций по совокупному воздействию изменений нескольких компонент экосистемы (климата, гидрологии, почв, растительности, грунтовых вод) [19, 21, 29, 31, 23, 24]. Заключительным этапом этой оценки является использование «Метода оценки нарушений в околоводных экосистемах по биологическим критериям и показателям при изменении обводненности территорий» [12, 7, 33, 38]. Эта поэтапная оценка применима для долинных, пойменных и дельтовых экосистем, подвергшихся не только антропогенным (гидротехническим) влияниям, но и естественным (климатическим).

С.А. Подольским с соавторами была разработана оценка нарушений в экосистемах вследствие гидротехнического строительства по одному из живых компонентов экосистемы – наземным позвоночным [63]. Несмотря на то что данная оценка изменений экосистем была разработана непосредственно для учёта гидротехнического воздействия, она применима также и при учёте изменений водного режима территорий в результате природных процессов.

Исследование и реабилитация мелиоративно нарушенных экосистем. Исследуется динамика экосистем болот, пойм и долин рек

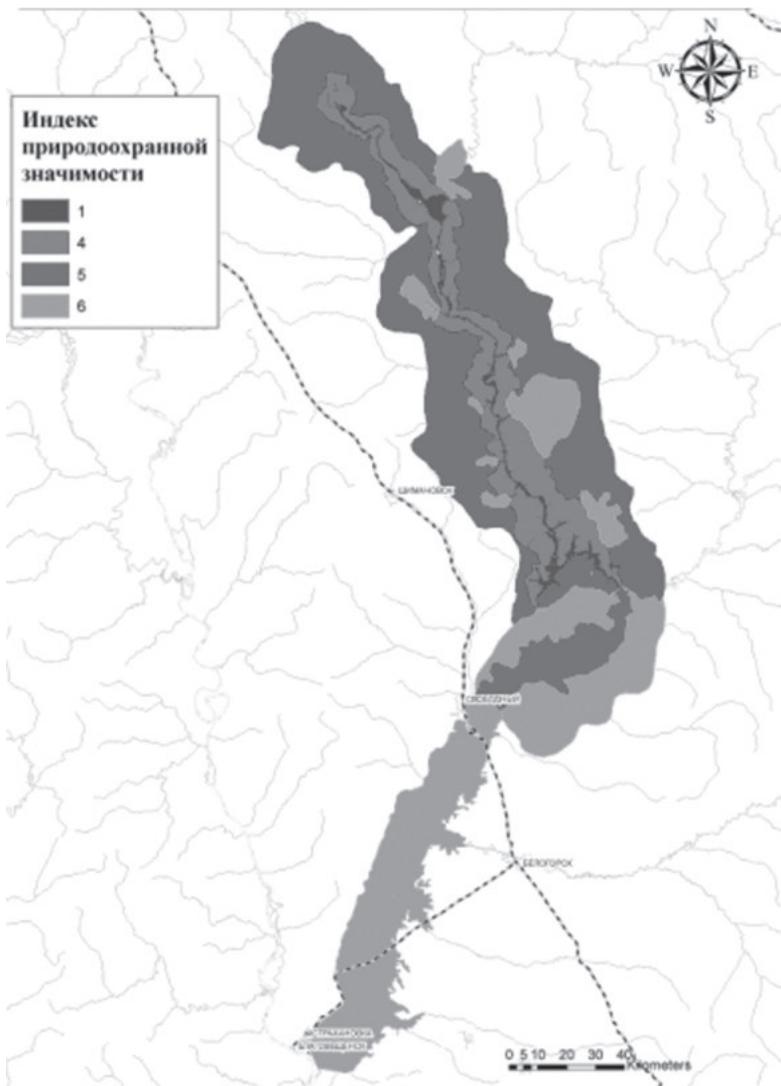


Рис. 11. Прогноз изменений индекса природоохранной значимости (Изп) проектируемого Нижнезейского водохранилища в период начала стабилизации экосистемы [63]

под влиянием естественных (климатических) и антропогенных (гидромелиорация, зарегулирование стока) изменений в государственном заказнике «Журавлиная родина» (Московская область). Изучаются изменения наземных экосистем осушенных торфяников под



Рис. 12. Опытный участок обводнения в заказнике «Журавлинная родина» влиянием обводнения, проведённого с использованием различных проектных решений (рис. 12).

Таким образом, в зоне Южной Тайги проводится многолетний мониторинг экосистем (по растительности, почвам, грунтовым и поверхностным водам, орнитофауне) осущёенных торфяников, а также экосистем долин рек в естественном и антропогенно нарушенном состоянии. Ведутся исследования динамики характеристик местообитаний по индикаторным видам птиц [12, 7] и по растительности с использованием экологических амплитудных шкал по показателю увлажнения, проводятся также мониторинговые исследования с использованием разработанного в лаборатории «Метода оценки нарушений в околоводных экосистемах по биологическим критериям и показателям при изменении обводнённости территории» [33, 38, 31, 29].

Рекомендации по охране, реализованные на практике. Разработанные предложения по созданию Особо охраняемых природных территорий (ООПТ) на территории Московской области и Приморья (автор С.А. Подольский) переданы в администрацию областей. Большая часть проектов уже реализована.

Предложения по экологически щадящему природопользованию на территории Талдомского района Московской области (автор

О.С. Гринченко) переданы в администрацию Талдомского района, осуществляются специальные севообороты и структура посевов с целью поддержания уникальной популяции серого журавля в бассейне реки Дубны.

Эколого-географическая база данных на территорию Южного Приаралья (авторы Н.М. Новикова, Ж.В. Кузьмина, Г.Ю. Трофимова) передана в Комитет по охране окружающей среды Республики Каракалпакстан (Узбекистан) и Нукусский государственный университет для обучения студентов.

В работе по Госконтракту с Министерством охраны окружающей среды (2012–14 гг.) по разработке экологического нормирования в применении к водному режиму экосистем и экотонов речных пойм лабораторией была решена важная фундаментальная задача – на основании собственных исследований охарактеризованы причинно-следственные связи в системе «речной сток → водный режим основных биотопов поймы → биотические комплексы» и сделана оценка их значимости.

### **Выходы**

Гидрогенная динамика экосистем может быть обусловлена внешними (природными и антропогенными) и внутренними (саморазвитие) причинами. Оценка направленных изменений в экосистемах чрезвычайно сложная задача, она может выполняться как покомпонентно, так и в целом, для всей экосистемы. Сегодня, в условиях изменяющегося климата, оценка и прогноз динамики экосистем – важнейшие задачи современной науки.

За время своего существования в Институте водных проблем РАН лабораторией Динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора была выполнена большая теоретическая и практическая научная работа по решению проблемы гидрогенной динамики наземных экосистем.

Проведена систематизация теоретических и практических задач, связанных с экологическим нормированием в применении к водному фактору. Выявлены информативные биологические показатели, адекватно отображающие экологически значимые изменения режима речного стока и водного режима биотопов на различных морфологических элементах пойменного рельефа.

Установлены закономерности динамики водного режима различных морфологических частей пойм и структуры экотонов при изменении режима речного стока и флуктуациях климата [80].

Решён один из узловых вопросов экологического нормирования – выявлены информативные и объективные критерии, способные адекватно отражать экологически значимые изменения режима речного стока и водного режима различных морфологических частей пойм (обеспеченность длительности и частоты заливания, изменение амплитуды сезонного и разногодичного колебания уровня грунтовых вод).

Охарактеризованы механизмы динамики экосистем на основании разностороннего анализа имеющихся данных об антропогенных и естественных изменениях водного режима на рассматриваемых территориях.

Получены данные о развитии процессов, сопутствующих изменению водного режима территорий в различных географических зонах.

Решена одна из центральных задач в проблеме – определены оптимальные, допустимые и критические значения водного фактора, при которых происходят необратимые перестройки структуры популяций биологических видов, ресурсного потенциала, биоразнообразия и функционирования экосистем.

Обоснован выбор критериев, на основании которых можно судить о допустимых пределах регулирования режима речного стока в масштабах речного бассейна.

Определены некоторые универсальные ограничения и параметры, которые должны соблюдаться при освоении гидроэнергоресурсов Дальнего Востока РФ: установлено, что расстояния между зонами трансформации природной среды соседствующих гидроузлов в проектируемых каскадах должны составлять не менее 80–100 км; даны рекомендации по количеству, размещению и площадям особо охраняемых природных территорий в районах активного современного гидротехнического строительства; обоснован вывод об экологической опасности строительства плотин на р. Амур.

За последние годы в лаборатории Динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора ИВП РАН в соответствии с поставленными задачами по разработке оценочных динамических показателей как для неживых, так и для живых компонент экосис-

тем, был разработан показатель для оценки изменений климатических компонент экосистем; были установлены показатели динамической оценки совокупного влияния климатических компонент (температуры и осадков); были разработаны оценочные показатели для нескольких живых компонент экосистем – растительности и животного населения (наземных позвоночных и птиц), включая структурно-функциональные особенности орнитокомплексов в целом; установлен индикационный оценочный показатель быстрой трансформации экосистем торфяников; установлен оценочный показатель процесса разрушения береговой экосистемы; разработаны методические подходы и методы оценки нарушений во всей экосистеме по совокупному анализу трансформаций нескольких её компонентов.

Перспектива дальнейших исследований лаборатории связана с развитием теоретических представлений: о закономерностях изменений наземных экосистем в современных условиях изменяющегося климата и усиления гидротехнического воздействия, о закономерностях проградационной динамики экосистем – их адаптации и стабилизации в измененных гидрологических и климатических условиях, а также закономерностях восстановления экосистем после снятия антропогенных нагрузок. Все это даст возможность подойти к непосредственному прогнозу трансформации экосистемного покрова регионов и планеты при различных вариантах развития событий в условиях естественных и антропогенных (гидротехнических) изменений среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б. Вопросы создания и рационального использования водохранилищ // Воды суши: проблемы и решения. М.: ИВП РАН, 1994. С. 414–435.
2. Авакян А.Б., Лебедева И.П. Водохранилища XX века как глобальное географическое явление // Известия АН. Серия географическая. №3, 2002. С. 13–20.
3. Антонов А.И., Яковлев А.А., Подольский С.А. Видовой состав птиц среднего течения реки Зея (Амурская область) // Фауна Урала и Сибири. Региональный фаунистический журнал. №2, 2015. С. 23–43.
4. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / Отв. ред. Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. М.: Наука, 2003. 367 с.
5. Будыко М.И. Эволюция биосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 488 с.

6. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-пресс, 2012. 576 с.
7. Волков С.В., Гринченко О.С., Свиридова Т.В. Влияние погодных и климатических колебаний на изменение сроков осенней миграции северного журавля (*Grus grus*) в северном Подмосковье // Зоологический журнал. Т. 95, №10, 2016. С. 1182–1191.
8. Волкова Н.А., Назаренко О.Г. Геоэкологическая характеристика природно-территориальных комплексов современного гидроморфизма (на примере юго-восточных отрогов Донецкого кряжа). М.: РАСХН, 2005. 237 с.
9. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2014. 61 с.
10. Глазовский Н.Ф. Аральский кризис: причины возникновения и пути выхода / Отв. ред. Н. Т. Кузнецов. М.: Наука, 1990. 134 с.
11. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1998 году». М.: МПР, 1999. 573 с.
12. Гринченко О.С., Свиридова Т.В. Сохранение птиц в условиях современного сельского хозяйства: практика взаимодействия с землепользователями // Материалы I Международной орнитологической конференции «Птицы и сельское хозяйство: современное состояние, проблемы и перспективы изучения», 17–18 ноября, 2016 г. М.: Знак, 2016. С. 60–66.
13. Дарманов Т.А., Подольский С.А., Красикова Е.К. Роль климатических факторов в динамике численности волка и объектов его охоты на территории Зейского заповедника // Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов. Материалы V международной научно-практической конференции: Климат, экология, сельское хозяйство Евразии. 26–29 мая, 2016. Иркутск, 2016. С. 179–184.
14. Зайдельман Ф.Р., Тюльпанов В.И., Ангелов Е.Н., Давыдов А.И. Почвы мочарных ландшафтов – формирование, агроэкология и мелиорация. М.: Изд-во Московского университета, 1998. 159 с.
15. Залетаев В.С. Изучение наземных экосистем в цикле исследования водных проблем // Водные проблемы на пороге нового тысячелетия. М.: Наука, 1999. С. 306–315.
16. Залетаев В.С. Экологически дестабилизированная среда (экосистемы аридных зон в изменяющемся гидрологическом режиме). М.: Наука, 1989. 150 с.
17. Клиге Р.К., Данилов И.Д., Конищев В.Н. История гидросферы. М.: Научный мир, 1998. 368 с.
18. Кочарян А.Г., Лебедева И.П. Гидроэкология: водохранилища – баланс противоречий // Инженерная экология. №5, 2014. С. 13–31.
19. Кузьмина Ж.В. Оценка последствий изменения режима речного стока для пойменных экосистем при создании малых гидротехнических сооружений на равнинных реках // Метеорология и гидрология. №8, 2005. С. 89–103.

20. Кузьмина Ж.В. Анализ многолетних метеорологических трендов на Юге России и Украины (от лесостепи до пустынь) // Аридные экосистемы. Т. 13, №32, 2007а. С. 47–61.
21. Кузьмина Ж.В. Воздействие низконапорных гидротехнических сооружений на динамику наземных экосистем зоны широколиственных лесов Центральной и Восточной Европы. Автореф. дисс. ... докт. г.н. Москва. ИВП РАН. 2007б. 44 с.
22. Кузьмина Ж.В. Динамические изменения экосистем и вопросы их оценки// Экосистемы: экология и динамика. Т. 1, №1, 2017. С. 10–25 (<http://www.ecosystemsdynamic.ru>).
23. Кузьмина Ж.В., Каримова Т.Ю., Трёшкин С.Е., Феодоритов В.М. Влияние климатических изменений и зарегулирования речного стока на динамику растительности долин рек // Использование и охрана природных ресурсов в России. №2 (116), 2011а. С. 34–40.
24. Кузьмина Ж.В., Каримова Т.Ю., Трёшкин С.Е., Феодоритов В.М. Воздействие антропогенного регулирования речного стока и климатических изменений на динамику растительности долин рек // Антропогенная динамика растительного и почвенного покровов лесной зоны. Сборник научных трудов кафедры земледелия и растениеводства. М.: Государственный Университет по землеустройству, 2011б. С. 125–147.
25. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Засоление почв и динамика пойменной – тугайной растительности: на примере регионов Юго-Восточного Прикаспия и Приаралья // Почвоведение. №6, 1997. С. 726–735.
26. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Современное состояние флоры и растительности заповедника «Бадай-Тугай» в связи с изменением гидрологического режима // Ботанический журнал. Т. 86, №1, 2001. С. 73–84.
27. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Формирование растительности на солончаках обсохшего дна Аральского моря в изменяющихся климатических условиях // Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук. №1, 2009. С. 32–35.
28. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Влияние климатических флюктуаций и способов посадки галофитных кустарников на результаты фитомелиорации солончаков Приаралья // Аридные экосистемы. №3 (43), 2010. С. 67–76.
29. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Метод оценки гидротехнического воздействия и климатических изменений на экосистемы // Антропогенная динамика почв и растительности лесной зоны. М., 2011а. С. 148–163.
30. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Результаты многолетнего мониторинга развития галофитных растений на солончаках Приаралья // Аридные экосистемы. №3 (48), 2011б. С. 23–37.
31. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Оценка последствий гидротехнического воздействия на экосистемы пойменных гидроморфных и полуавтоморфных территорий // Актуальная биогеография. Вопросы географии. Вып. 134. М.: Издательский дом «Кодекс», 2012а. С. 298–313.

32. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Тугай и возможности их восстановления в современный период // Аридные экосистемы. №3 (52), 2012б. С. 44–59.
33. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Влияние климатических и гидрологических изменений на трансформацию естественных и антропогенно нарушенных в результате мелиорации экосистем зоны южной тайги // Рекультивация и использование залежных земель в Нечерноземной зоне России: теория и практика. Материалы Международной научно-практической конференции ГНУ ВНИИМЗ Россельхозакадемии. Тверь. 2012. С. 89–109.
34. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Климатические изменения в бассейне Нижней Волги и их влияние на состояние экосистем // Аридные экосистемы. Т. 20, №3 (60), 2014а. С. 14–32.
35. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Обусловленные режимом водных объектов биологические показатели, отражающие структурно-функциональные изменения околоводных наземных экосистем // Изменение состава и структуры ландшафтов в условиях техногенеза. Сборник научных трудов кафедры земледелия и растениеводства, посвященный 90-летию кафедры / Под общ. ред. Л.П. Груздевой. М.: Государственный университет по землеустройству, 2014б. С. 87–115.
36. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Многолетние изменения основных метеорологических характеристик в бассейне Амура // Использование и охрана природных ресурсов в России. №4 (148), 2016а. С. 50–61.
37. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Климатические изменения в Приаралье и Средней Азии // Аридные экосистемы. 2016б. Т. 22. №4(69). С. 5–20.
38. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е., Каримова Т.Ю. Воздействие основных тенденций совокупного влияния климатических и гидрологических изменений на сукцессионную динамику растительности в мелиоративно трансформируемых экосистемах зоны южной тайги // Материалы Международной практической конференции «Современные проблемы использования мелиорированных земель и повышения их плодородия», г. Тверь, 27–28 июня 2013 г. Тверь. 2013. С. 246–252.
39. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е., Каримова Т.Ю. Динамические изменения наземных экосистем поймы и дельты Нижней Волги под влиянием зарегулирования речного стока и климатических флюктуаций // Аридные экосистемы. Т. 21, №4(65), 2015а. С. 39–53.
40. Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е., Каримова Т.Ю. Критерии климатического и антропогенного заболачивания наземных экосистем в долинах рек // Болота и биосфера: материалы Всероссийской с международным участием IX школы молодых ученых (14–18 сентября 2015 г., г. Владимир). Иваново: ПресСто. 2015б. С. 219–224.
41. Михайлов В.Н., Доброльский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2005. 463 с.
42. Неронов В.М., Кузьмина Ж.В. Об охране генофонда эндемичных видов флоры Монголии // Проблемы освоения пустынь. №5, 1989. С. 45–51.

43. Назаренко О.Г. Современные процессы развития локальных гидроморфных комплексов в степных агроландшафтах. Автореф. дисс. доцента биол. наук. М.: МГУ, 2002. 46 с.
44. Новикова Н.М., Волкова Н.А., Назаренко О.Г. К методике изучения и оценки воздействия водохранилищ на природные комплексы побережий // Аридные экосистемы. Т. 21, №4 (65), 2015. С. 84–94.
45. Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Шаповалова И.Б., Вышивкин А.А. Изучение гидрогенных процессов в биоте степной зоны // Актуальная биогеография. Вопросы географии / Отв. ред. С.М. Малхазова, Е.Г. Мяло, Н.М. Новикова, Н.Б. Леонова. Вып. 134. М: Издательский дом «Кодекс», 2012. С. 265–297.
46. Новикова Н.М., Давыдова Н.С. Гидрохимический режим прудов при их разном использовании на территории Воронежской области // Вода: химия и экология. №4, 2010. С. 2–8.
47. Новикова Н.М., Кузьмина Ж.В. Мониторинг ландшафтно-экологических процессов в дельте Амудары: по результатам исследований на муйнакской международной станции // Аридные экосистемы. Т. 6, №13, 2000. С. 23–36.
48. Новикова Н.М., Кузьмина Ж.В., Подольский С.А., Балюк Т.В. Критерии, ограничивающие регулирование режима речного стока по экологическим показателям // Аридные экосистемы. Т. 11, №28, 2005. С. 26–38.
49. Новикова Н.М., Кузьмина Ж.В., Шумова Н.А., Кутузов А.В. Опасность изменения грунтовых вод и подтопления земель // Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Южного федерального округа Российской Федерации. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2007. С. 240–245.
50. Новикова Н.М., Назаренко О.Г. Современный гидроморфизм: процессы, формы проявления, признаки // Аридные экосистемы. Т. 13, №33–34, 2007. С. 68–80.
51. Новикова Н.М., Назаренко О.Г. Природные комплексы побережий искусственных водоёмов на юге европейской части России // Аридные экосистемы. Т. 19, №3, 2013. С. 35–62.
52. Новикова Н.М., Назаренко О.Г., Волкова Н.А. Методика оценки гидрогенной трансформации природных комплексов побережий водохранилищ // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1, №2, 2017. С. 21–51 (<http://www.ecosystemsdynamic.ru>).
53. Новикова Н.М., Уланова С.С. Эколо-географическая оценка искусственных водоёмов Калмыкии и экотонных систем «вода–суша» на их побережьях // Проблемы региональной экологии. №2, 2008. С. 33–39.
54. Новикова Н.М., Шафрот П.Б. Проблема сохранения природного биоразнообразия в условиях регулирования речного стока на западе США // Материалы МЦ РГО. Биогеография. Вып. 13. Москва: РАСХН, 2007. С. 88–100.

55. Оценка влияния изменения режима вод суши на наземные экосистемы / Отв. ред. Н.М. Новикова. М.: Наука, 2005. 365 с.
56. Панкова Е.И., Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Влияние грунтовых вод на состояние почвенного и растительного покрова в оазисах Южной Гоби Монголии и перспективы рационального использования земель // Водные ресурсы. 21, №3, 1994. С. 358–364.
57. Панкова Е.И., Кузьмина Ж.В., Трёшкин С.Е. Состояние тугайной растительности в оазисах Южной Монголии и перспективы их восстановления // Аридные экосистемы. Т. 2, №2–3. М., 1996. С. 131–144.
58. Педь Д.А. О показателях засухи и избыточного увлажнения // Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 156, 1975. С. 19–39.
59. Переведенцев Ю.П., Исмагилов Н.В., Шерстюков Б.Г., Наумов Э. П., Шанталинский К.М., Гоголь Ф.В. Современные изменения климата республики Татарстан // Вестник ВГУ. Серия: География, Геоэкология. №2, 2008. С. 13–23.
60. Подольский С.А., Дарман Ю.А., Колобаев Н.Н. Динамика популяций копытных животных // Влияние Зейского водохранилища на наземных позвоночных. Благовещенск, 2000. С. 124–152.
61. Подольский С.А., Игнатенко С.Ю., Игнатенко Е.В., Тиунова Т.М., Павлова К.П., Коцюк Д.В., Антонов А.И., Михеев П.Б., Шмигрилов А.П., Борисова И.Г., Старченко В.М. Методология организации и ведения мониторинга биоразнообразия в зонах влияния ГЭС на примере крупных гидроузлов Приамурья // Вестник Дальневосточного отделения РАН. №1 (185), 2016а. С. 15–25.
62. Подольский С.А., Левик Л.Ю., Павлова К.П., Красикова Е.К. Редкие и краеареальные виды грызунов бассейна р. Зеи в условиях влияния гидростроительства // Амурский зоологический журнал VIII (2). 2016б. С. 154–167.
63. Подольский С.А., Кастроин В.А., Парилов М.П., Павлова К.П., Левик Л.Ю. Возможности сравнительной оценки обобщенных показателей видового разнообразия и численности животного населения на примере зоны влияния проектируемого Нижне Зейского гидроузла // Экосистемы: экология и динамика. Т. 1, №1, 2017. С. 55–73 (<http://www.ecosystemsdynamic.ru>).
64. Природные комплексы побережья Цимлянского водохранилища / Под ред. Н.М. Новикова. М.: Агронauчсервис, 2014. 152 с.
65. Селянинов Г.Т. К методике сельскохозяйственной климатографии // Труды по с.-х. метеорологии. Т. 22. Л.: Издательство Отдела с.-х. метеорологии Гос. ин-та опытной агрономии, 1930.
66. Трёшкин С.Е., Кузьмина Ж.В. Восстановление деградированных земель Приаралья в условиях изменения климата // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. №1, 2010. С. 79–83.
67. Трёшкин С.Е., Кузьмина Ж.В. Структура древесно-кустарниковых тугаев низовьев Амударьи // Вестник КК ФАН УзССР. №4, Нукус, 1989. С. 35–39.
68. Трёшкин С.Е., Кузьмина Ж.В. Современное состояние пойменных лесных экосистем рек Амудары и Сумбара в связи с антропогенным

воздействием // Проблемы освоения пустынь. №2. Ашхабад, 1993. С. 14–19.

69. Цыганов А.Н., Новенко Е.Ю., Бабешко К.В., Мазей Н.Г., Борисова Т.В., Мазей Ю.А. Реконструкция послепожарной сукцессии болотных экосистем по данным палеоэкологического анализа // Сборник трудов конференции. Современные концепции экологии биосистем и их роль в решении проблем сохранения природы и природопользования. Материалы Всероссийской (с международным участием) научной школы – конференции, посвященной 115-летию со дня рождения А.А. Уранова. 2016. С. 210–212.

70. Шаповалова И.Б. Орникомплексы побережий Цимлянского водохранилища // Аридные экосистемы. Т. 21, №4 (65), 2015. С. 95–105.

71. Шаповалова И.Б. Современное состояние орнитофауны искусственного водоёма Сарпа под влиянием водного и антропогенного факторов // Проблемы региональной экологии. №4, 2016. С. 38–45.

72. Шаповалова И.Б., Завьялов Е.В. Орникомплексы островов Волгоградского водохранилища: состав, структура и динамика. М.: РАСХН, 2009. 222 с.

73. Шумова Н.А. Исследование естественной водообеспеченности посевов в лесостепной и степной зонах // Метеорология и гидрология. №11, 2001. С. 79–89.

74. Шумова Н.А. Закономерности формирования водопотребления и водообеспеченности агроценозов в условиях юга Русской равнины. М.: Наука, 2010. 239 с.

75. Шумова Н.А. Влияние мульчирования на суммарное испарение полей яровой пшеницы на юге Русской равнины // Метеорология и гидрология. №2, 2010. С. 82–91.

76. Шумова Н.А. Агрогидрологическая эффективность посевов яровой пшеницы по паровому предшественнику в лесостепной и степной зонах // Метеорология и гидрология. №6, 2012. С. 72–80.

77. Шумова Н.А. Анализ динамики разрушения берегов Цимлянского водохранилища // Аридные экосистемы. Т. 23, №3(73), 2017. (В печати).

78. Шумова Н.А. Прогноз и наблюдаемые смещения береговой линии Цимлянского водохранилища // Аридные экосистемы. Т. 19, №3 (56), 2013. С. 43–50.

79. Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: Изд-во «Перо», 2014. 399 с.

80. Экотонные системы «вода–суша»: методика исследований, структурно-функциональная организация и динамика / под ред. Н.М. Новиковой. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 272 с.

81. Duel H. Cyclic floodplain rejuvenation: a new strategy based on floodplain measures for both flood risk management and enhancement of the biodiversity of the river Rhine. NCR publication. 2001. Ph. 54–60.

82. Kouzmina J.V. Soil Salinization and floodplain Ecosystems of South-West Turkmenistan // Sabkha Ecosystems. Vol. 2. West and Central Asia / Ed. By M. Ajmal Khan et al. Springer science, 2006. Pp. 99–111.

83. Kouzmina J.V. The impact of natural and human-induced changes in the river flow and the climate on flood plain ecosystems in the middle Elbe river basin // Ecological Engineering and Environment Protection. №2, 2004. Pp. 5–15.
84. Kouzmina J., Treshkin S., Henrichfreise A. The Monitoring Comparative Results of the Floodplain Ecosystems in Regulated and Natural Part of the Danube River (Geisling-Passau) // Korean Journal of Ecology. Vol. 27, №4, 2004. Pp. 211–216.
85. Kouzmina J.V., Treshkin S.Y., Avetjan S.A., Henrichfreise A. Assessment of consequences change of river flow regime for floodplain ecosystems under building small and middle hydrotechnical constructions // Journal of Hydrology and Hydromechanics. Vol. 53, №1, Prague, Czech Republic, 2005. Pp. 3–16. (in english).
86. Kuzmina Zh.V., Treshkin S.Ye. Phytomelioration of Solonchaks in the Uzbekistan Pre-Aral Region Under Recent Climate Change//Aralkum – a Man-Made Desert. The Desiccated Floor of the Aral Sea (Central Asia) / Eds. S-W. Breckle, W. Wucherer, L.A. Dimeeva, N.P. Ogar. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012. Pp. 407–429.
87. Kuz'mina Zh.V., Treshkin S.Y. Assesment of Effects of Discharged waters upon Ecosystems // Ecology and Ecosystems. Ed. By Igor S. Zektser. Springer science, 2006. (Part III Antropogenic Development, Geology and Ecosystems.) Pp. 149–160.
88. Lugo A., Brown S., Brinson M. Concepts in wetland ecology// Forested wetlands. New York: Elsevier. 1990. Pp. 53–85.
89. Novikova N.M., Aldjakova O.A. Ecosystem monitoring under desertification within interior sea-lakes and deltas/ Geology and Ecosystems/ Ed. By Igor S. Zektser. Springer science, 2006. P. 281–294.
90. Novikova N.M., Kust G.S., Kuzmina J.V., Trofimova G.U., Dikariova T.V., Avetian S.A., Rozov S.U., Deruzhinskaya V.O., Safonicheva L. F., Lubeznov U.E. Contemporary plant and soil cover changes in the Amu-Dar'ya and Syr-Dar'ya river deltas // Ecological Research and Monitoring of the Aral Sea Deltas. UNESCO: Paris. 1998. Pp. 55–80.
91. Novikova N.M., Kuz'mina Zh.V. Monitoring of the vegetation in conditions of the Aral Sea ecological crisis. M.: RAAS, 2008. 218 p.
92. Novikova N.M., Kuz'mina J.V., Dikareva T.V., Trofimova T.U. Preservation of the tugai biocomplex diversity within the Amu-Darya and Syr-Darya river deltas in aridization conditions // Ecological research and monitoring of the Aral sea deltas. Book 2. UNESCO: Printing Saggraphic, Barcelona. 2001. Pp. 155–188.
93. Shafroth P.B., Friedman J.M., Auble G.T., Scott M.L., Braatne J.H. Potential responses of riparian vegetation to dam removal // BioScience. Vol. 52, №8, 2002. August. Pp. 703–712.
94. Shumova N.A. Approach and evaluation of soil water resources in an arid region of the European steppe zone territory // Journal of Hydrology and Hydromechanics. Vol. 48, №6, 2000. P. 381–398.

## **Качество вод бассейна реки Оки и степень их загрязнения**

*Р.Г. Джамалов, А.М. Никаноров, О.С. Решетняк, К. Г. Мягкова, Т.И. Сафронова*

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект №17-05-00518

### **Введение**

Река Ока – самый крупный правый приток реки Волги с площадью водосбора 245 тыс. км<sup>2</sup> и общей длиной 1500 км. Бассейн Оки расположен в центре Европейской части России и охватывает 16 административных субъектов Российской Федерации, включая г. Москву, несколько областных центров, сотни городов и посёлков городского типа, тысячи сельских населённых пунктов. Сток самой Оки можно считать условно естественным, так как только её приток река Москва зарегулирована гидротехническими сооружениями. В бассейне Оки насчитывается 19234 реки, из них 17618 (или 91,6 %) – малые реки с длиной менее 10 км. Средняя густота речной сети – 0,37 км/км<sup>2</sup>, снижается до 0,2–0,3 км/км<sup>2</sup> на территории Мещёрской низменности (реки Пра, Гусь) и карстовых районах (реки Теша, Зуша) и возрастает до 0,5–0,6 км/км<sup>2</sup> в пределах Смоленско-Московской возвышенности (реки Воря, Пекша, Колокша). Имеет более 30 притоков, самые крупные из которых реки Клязьма, Москва, Угра, Мокша с притоком Цна. Водный режим отличается высоким весенним половодьем, летней и зимней меженью, осенними паводками. Питание Оки преимущественно снегодождевое, в зимний период – подземными водами [10].

Вся площадь бассейна располагается в умеренном климате. Годовая величина атмосферных осадков снижается с запада на восток от 750 мм до 650 мм. Твёрдые осадки в течение года составляют около 30%, жидкие – 70%. Такое соотношение связано с тем, что в условиях современных мягких зим и частых переходов температуры воздуха через 0°C наблюдается рост выпадений в виде дождя. Средняя интенсивность осадков за теплый период составляет немногим более 1,6 мм/час. Однако в последние десятилетия продолжительность и частота выпадения слабых по интенсивности осадков уменьшается, а сильных и очень сильных растёт. Ливневые осадки с интенсивностью более 0,5 мм/мин могут вызвать максимальные расходы дождевых паводков и быстрое повышение уровней малых рек.

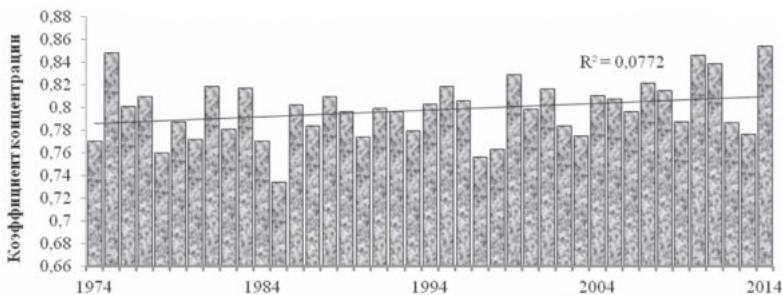


Рис. 1. Распределение коэффициента концентрации жидких осадков по метеостанциям в бассейне Оки

Рассмотрено, насколько неравномерно выпадают осадки в течение месяца в бассейне Оки с помощью так называемого коэффициента концентрации жидких осадков, т.е. насколько неравномерно в течение каждого месяца с апреля по октябрь выпадают осадки за период с 1974 по 2014 гг. Для этого сумму по месяцам тёплого периода делим на сумму среднемесячных величин осадков за этот период (рис. 1). Значение коэффициента концентрации, близкое к 1 означает, что все осадки выпадали в 1 день. Коэффициент концентрации осадков рассчитан как средневзвешенный по площадям метеостанций.

### **Динамика стока рек бассейна Оки**

Речной сток в бассейне Оки постепенно возрастает за период инструментальных наблюдений. Среднее увеличение расходов воды за 1930–2012 гг. при аппроксимации многолетних колебаний линейным трендом составляет  $40 \text{ м}^3/\text{s}$  за 10 лет. В ещё большей степени проявляются за этот период увеличение подземной составляющей общего стока – около  $70 \text{ м}^3/\text{s}$  за 10 лет. Аналогичный характер колебаний прослеживается для подземной составляющей стока в лимитирующий месяц как в течение летне-осеннего (VI–X), так и зимнего (XI–III) периодов.

Наблюдениями на Валдайском стационаре ГИ установлено, что разгрузка подземных бассейнов в реки носит пульсирующий характер. Это обусловлено тем, что гидравлический импульс инфильтрационного питания водоносного горизонта (в весенний и осенне-зимний сезоны) вызывает импульс поршневого вытеснения части

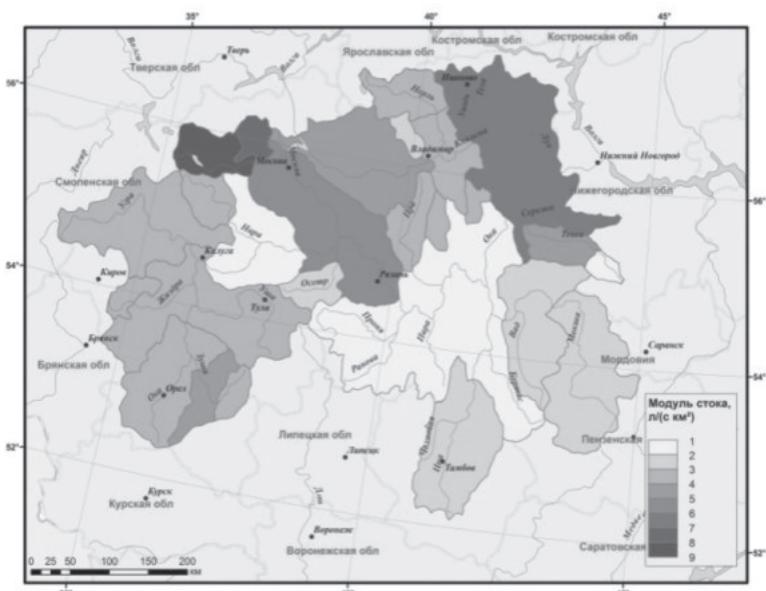
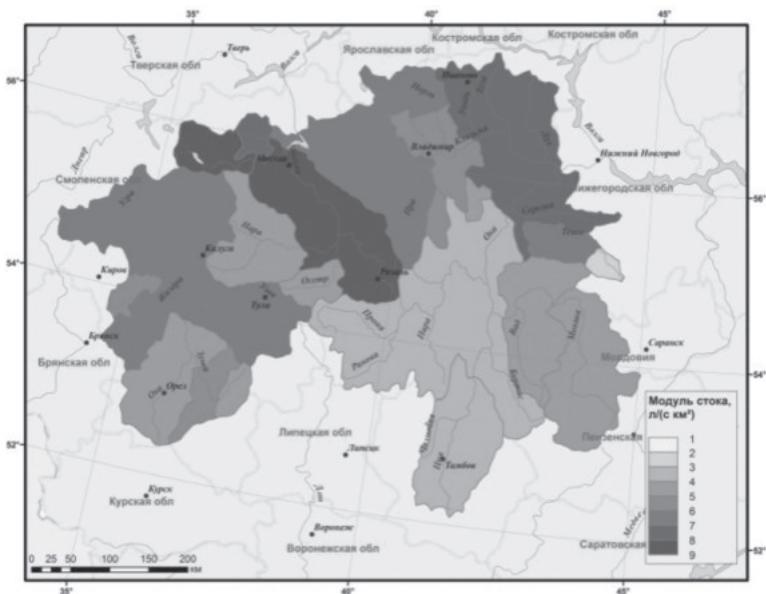


Рис. 2. Средние значения годового (а) и меженного (б) стока бассейна Оки (осреднённые за период 1978–2013 гг.)

подземных вод в реку. За счёт передачи гидростатического давления происходит волновое вытеснение порции «старой» воды при сохранении баланса между объёмами питания и разгрузки подземных и почвенных вод. Таким образом, изотопные, гидрохимические и другие виды детальных исследований показали, что порция инфильтрационного питания подземных вод сохраняется (аккумулируется) в водоносном горизонте или зоне аэрации на месяцы и годы и вытесняется в речную сеть очередными импульсами питания [11].

Непосредственные измерения степени участия различных генетических типов природных вод в формировании половодного и паводочного стока согласуются с особенностями формирования годового и сезонного стока под влиянием современных климатических условий. При этом различные по возрасту склоновый, почвенный и подземный стоки поступают в русовую сеть в импульсном режиме, что служит обоснованием наблюдаемых особенностей формирования сезонного стока. В частности, существенное увеличение зимнего стока обусловлено именно таким режимом разгрузки почвенных и подземных вод, которые получают дополнительное питание при частых оттепелях и слабом промерзании зоны аэрации [3; 9]. Следовательно, при подъёме и пике половодья в речном стоке преобладают поверхностно-склоновые и почвенно-грунтовые воды, на спаде половодья – почвенно-грунтовые, а в период летней и зимней межени – грунтовые.

Суммарный сток Оки закономерно снижается с северо-запада на юго-восток (рис. 2, а). В верхнем течении реки (до г. Калуга) они составляют 6–7 л/(с·км<sup>2</sup>), для водосборов малых притоков – до 5, а максимальные значения (7–9 л/(с·км<sup>2</sup>)) характерны для северной и северо-западной частей региона – бассейнов рек Москвы, Нерли, Клязьмы. Правобережные притоки нижнего течения Оки отличаются низкими значениями стока, составляя 4–5, а в бассейне Цны до 3–4 л/(с·км<sup>2</sup>).

Распределение меженного (подземного) стока в Оксском бассейне носит неравномерный характер (рис. 2, б). Наиболее высокие его значения характерны нижнему течению Оки (от г. Касимов до г. Горбатов), бассейнам рек Москва и Клязьма, где модули стока достигает 7–8 л/(с·км<sup>2</sup>). Наименьшими значениями подземного

Таблица 1

**Водные ресурсы в бассейне Оки и их изменение за 1946–2013 гг.  
(р. Ока – г. Горбатов)**

Период	Показатель	W, км <sup>3</sup> /год	W <sub>подз.</sub> , км <sup>3</sup> /год	W мин. месячный, км <sup>3</sup> /год	
				зима	лето–осень
1946–1977	Среднее	36,5	20,2	14,5	16,6
	Cv	0,22	0,21	0,24	0,23
1978–2013	Среднее	43,1	29,4	24,3	23,8
	Cv	0,18	0,15	0,21	0,18
Изменение, %		18	46	67	43
F-критерий Фишера		0,97	1,10	2,20	1,29
t-критерий Стьюдента		-3,54	-9,02	-9,30	-7,46

стока обладает юго-восточная часть бассейна, где модули снижаются до 2–3 л/(с·км<sup>2</sup>), а в бассейнах рек Вада и Мокша – до 1–2 л/(с·км<sup>2</sup>). На участках с минимальными модулями подземного стока наблюдается их увеличение до 100%. Для остальных рек прирост величин меженного стока составляет около 50–70%, снижаясь на участках от г. Калуга до г. Кашира и от с. Половское до г. Касимов до 15–20%.

Доля подземного стока в суммарном стоке бассейна Оки меняется от 0,3 до 0,7, составляя в среднем около 0,4–0,6. Изменение этого соотношения наилучшим образом иллюстрирует всё возрастающую роль естественных ресурсов подземного стока в суммарных водных ресурсах региона (табл. 1). Согласно выполненным расчётам современные суммарные водные ресурсы в бассейне Оки составляют 43,1 км<sup>3</sup>/год, причём за 1976–2013 гг. они возросли в среднем на 18%. При этом 29,4 км<sup>3</sup>/год (около 70%) составляют ресурсы подземных вод [9]. Наибольшая водность для большинства рек бассейна наблюдалась в 1994 г. и составляла 100–171% от средней многолетней, а наименьшая водность в 2011 г. 58–80% от средних значений.

### **Химический состав речных вод и их загрязнение**

Изменчивость химического состава воды Оки за период 2000–13 гг. рассмотрена по таким показателям, как растворённый в воде кислород, хлориды, сульфаты, азот аммонийный, азот нитритный, азот нитратный, соединения железа (общего), меди, цинка, никеля, фенолы летучие, нефтепродукты, легкоокисляемые органические вещества (по БПК5) и трудноокисляемые органические вещества (по ХПК).

Оценка многолетней динамики качества воды и степени её загрязнённости проведена на основе сочетания дифференциированного и комплексного способов оценки. Комплексная оценка позволяет судить о гидрохимическом состоянии водной среды по ряду показателей качества воды и классифицировать степень её загрязнённости при антропогенной нагрузке. К наиболее информативным комплексным показателям качества воды относятся [4]: удельный комбинаторный индекс загрязнённости воды (УКИЗВ); класс качества воды (ККВ).

Значение УКИЗВ изменяются в зависимости от степени загрязнённости вод от 1 до 16. Большему значению индекса соответствует худшее качество воды. При оценке комплексного показателя оптимальное число учитываемых ингредиентов составляет от 10 до 25. Поэтому этот метод позволяет оценить и классифицировать загрязнённость воды по широкому спектру ингредиентов и показателей её качества. Обычно в качестве норматива используют ПДК вредных веществ для водных объектов рыбохозяйственного, хозяйственно-питьевого или культурно-бытового водопользования, т.е. методической основой комплексного способа служит оценка степени загрязнённости воды по совокупности ЗВ с выделением из них так называемых характерных ЗВ, частота превышения ПДК которых более 50% случаев. Основа дифференциированного способа – оценка качества воды водных объектов по отдельным загрязняющим веществам с использованием их ПДК и статистических методов.

Классификация качества воды, проведённая на основе значений УКИЗВ, позволяет разделять поверхностные воды на 5 классов в зависимости от степени их загрязнённости: 1-й класс – условно чистая; 2-й класс – слабо загрязнённая; 3-й класс – загрязнённая; 4-й класс – грязная; 5-й класс – экстремально грязная [4].

Смена генетических составляющих водного стока, гидрологических фаз и водности рек вызывает изменения минерализации и химического состава вод. В зависимости от ландшафтно-климатических условий водосборов рек и состава водовмещающих пород водоносных горизонтов в бассейне выделяются участки рек с очень малой минерализацией (менее 100 мг/дм<sup>3</sup>), малой минерализацией (100–200), средней минерализацией (200–500), повышенной минера-

лизацией (сумма ионов 500–1000) и высокой минерализацией воды (свыше 1000 мг/дм<sup>3</sup>) за счёт питания подземными водами из карбонатных пород и существенного загрязнения [5].

Гидрохимический режим рек бассейна Оки характеризуется естественными колебаниями во времени химического состава и отдельных его компонентов и веществ. Наряду с этим, современные особенности гидрохимического режима проявляются в колебании уровня загрязнённости воды различными ингредиентами, характеризующими как процессы антропогенного загрязнения, так и самоочищения водных объектов по обобщённым показателям качества и свойств речной воды.

Минерализация воды самой Оки от истоков до г. Мурома не выше 260–600 мг/дм<sup>3</sup> и только на отдельных участках ближе к низовьям достигает 700–800 мг/дм<sup>3</sup>. По составу вода гидрокарбонатно-кальциевая. По течению реки содержание гидрокарбонатных ионов постепенно уменьшается, а сульфатных ионов возрастает, особенно в меженный зимний и летний периоды с декабря по март и с июня по сентябрь. Минимальные величины минерализации воды возросли за последние десятилетия со 120 мг/дм<sup>3</sup> в 1991–2001 гг. до 510 мг/дм<sup>3</sup> в 2009–2011 гг., что может быть связано с маловодьем последних лет и возросшей степенью загрязнения. Кроме того, речные воды при высоких паводках и половодье обогащаются органическими кислотами, что увеличивает их цветность, снижает pH и уменьшает содержание гидрокарбонатов. В межень вода рек вновь приобретает гидрокарбонатно-кальциевый состав. Подобное влияние на состав природных факторов, конечно, не исключает антропогенное воздействие на гидрохимический режим речных вод и их загрязнение. При этом химические показатели позволяют охарактеризовать не только качество вод, но и установить степень загрязнённости воды, выявить источники загрязнения, определить соответствие воды требованиям конкретных водопользователей [6; 7].

Химический состав воды Оки изменяется вниз по течению, что можно проследить по трём характерным участкам: первый – от истока до устья реки Угры, второй – от устья Угры до г. Мурома и третий – ниже г. Мурома до устья. Первый участок в верховьях Оки отличается значительным влиянием на химический состав речной воды подземных вод карбонатных отложений девона из-за глубоких

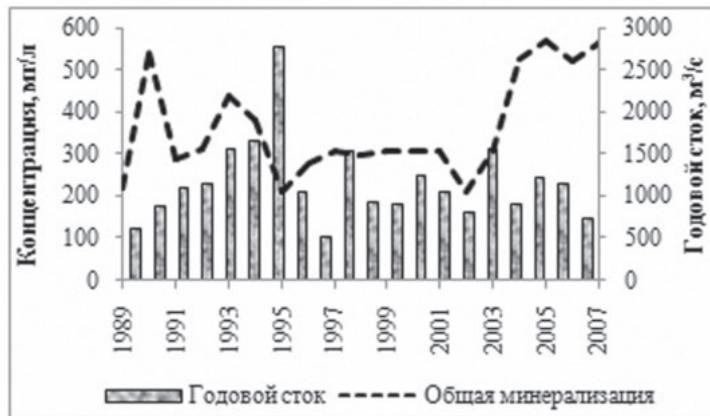
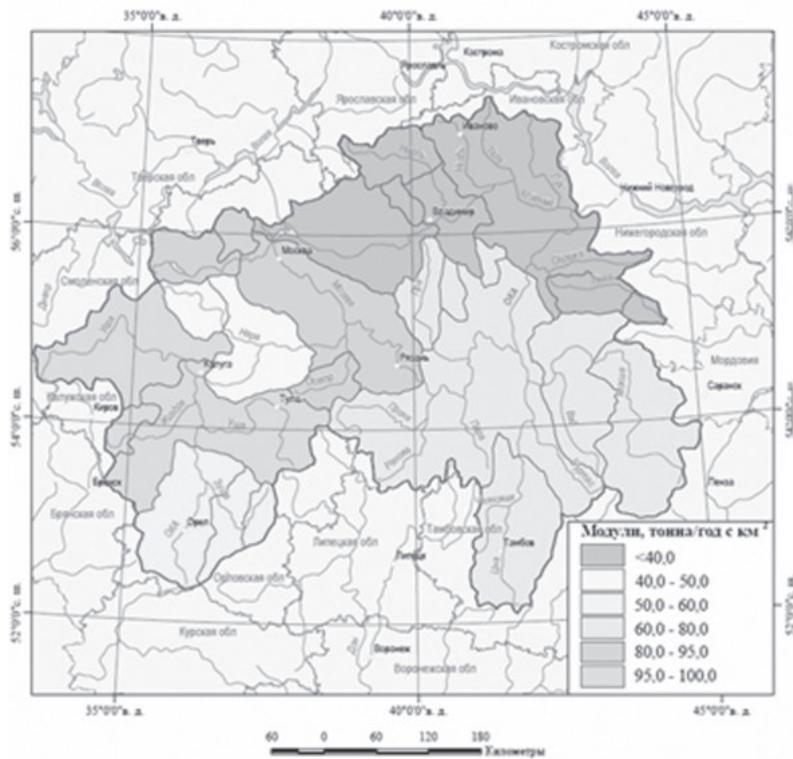


Рис. 3. Карта-схема распределения минерализации речных вод и график временной динамики изменений этого показателя по течению реки [10]

врезов речных долин. Поэтому активное дренирование известняков обуславливает здесь значительную минерализацию речных вод. На втором участке сначала происходит снижение минерализации под влиянием вод чистых рек Угры, Протвы, Нары и др., но ниже по течению, после впадения загрязнённых вод рек Москвы, Протвы, Мокши, наблюдается постепенное её увеличение (до 600 мг/дм<sup>3</sup>). Третий участок отличается повышением общей минерализации (до 700–800 мг/дм<sup>3</sup>) под влиянием близко залегающих в этой части бассейна отложений карбонатных пород с гипсом пермской системы. В связи с ростом минерализации воды ниже г. Мурома в годы низкой водности (примерно с 2007 г.) содержание в ней сульфатов превышала 100 мг/дм<sup>3</sup>, достигая иногда 180–265 мг/дм<sup>3</sup>. Повышенная минерализация вод и обогащение их сульфатами, а также соединениями железа, марганца, меди и гумусовых веществ в основном обусловлено широким развитием карбонатных пород и заболоченностью водохранилищ самой Оки и её притоков [7].

Минерализация воды сравнительно мало изменяется по течению реки и в период пика половодья составляет 80–120 мг/л, в летний период повышается до 200–500 мг/л, а в период зимней межени возрастает до 450–570 мг/л. По химическому составу речные воды за анализируемый многолетний период сохраняют гидрокарбонатно-кальциевый состав. Однако вниз по течению реки относительное содержание гидрокарбонатных ионов постепенно уменьшается и увеличивается количество сульфатных ионов [7].

Содержание в воде хлоридов, сульфатов, азота нитратного и никеля не превышают ПДК во всех пунктах наблюдений. Постоянное или периодическое превышение ПДК по остальным показателям рассмотрено для каждого выделенного участка реки.

Верхнее течение реки. Выше и ниже г. Орёл превышение ПДК наблюдается по среднегодовым концентрациям: ХПК – в 1,1–1,7 раза, БПК<sub>5</sub> – 1,2–1,6 раза, азоту аммонийному – 1,1–1,25, азоту нитритному – 1,2–1,65, соединениям меди – 2,0–4,0, нефтепродуктам – в 1,1–1,4 раза. В значениях концентраций наблюдаются незначительные колебания. Постоянное ежегодное превышение ПДК отмечено только по содержанию органических веществ и соединениям меди. При этом концентрации всех веществ ниже города превышают их содержание выше города.

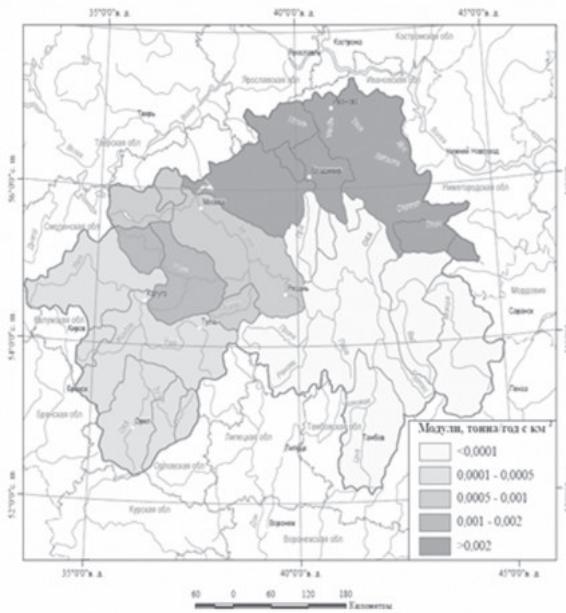


Рис. 4. Пространственно-временная динамика изменений растворённых солей сульфатов и хлоридов в бассейне р. Ока [7;10]

Как уже отмечалось гидрохимический состав воды преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый. Однако с увеличением подземной составляющей речного стока в меженный период начинает преобладать сульфаты, а концентрация хлоридов меняется незначительно и зависит в основном от антропогенных факторов (рис. 4).

Среднее течение реки. В створах выше и ниже г. Коломна наблюдается незначительное превышение ПДК по среднегодовым концентрациям: ХПК – в 1,5–2,0 раза, БПК<sub>5</sub> – 1,1–2,25, азоту аммонийному – в 1,5–3,3, соединениям железа – 1,3–3,0, соединениям никеля – 1,2–3,8, нефтепродуктам – в 1,2–2,4 раза. Периодические многократные превышения ПДК отмечены для азота нитритного – 1,5–5,0 раз, фенолов – 2,0–5,0 и соединений меди – 2,0–6,0 раз. Вода ниже города более загрязнена по всем ингредиентам и показателям.

Нижнее течение реки. В створах выше и ниже г. Дзержинск превышение ПДК наблюдается по среднегодовым концентрациям: ХПК – в 1,8–2,2 раза; БПК<sub>5</sub> – в 1,1–1,8, сульфатам – 1,4–1,7, азоту аммонийному – в 1,1–1,9, азоту нитритному – в 1,1–3,4, соединениям железа – в 1,1–2,1, соединениям меди – в 3,0–7,0, соединениям цинка – в 1,3–2,1 раза. Существенных различий в кратности превышения ПДК выше и ниже города не наблюдается.

Следует особо отметить повышенное содержание железа общего практически на всём протяжении реки Оки и её притоков, что обусловлено природными заболоченными ландшафтами территории формирования стока (рис. 5).

### **Изменчивость качества воды**

Качество воды обычно характеризуется физическими, химическими и бактериологическими свойствами и оказывает влияние на окружающую среду и человека. Вместе с тем, важным показателем состояния водной среды служит не только её качество, но и степень загрязнённости. Поэтому динамика химического состава и качества воды на различных участках реки заслуживает особого внимания.

Анализ многолетней гидрохимической информации выявляет определённые тенденции в динамике степени загрязнённости воды с 2000 по 2013 гг. Наименее загрязнено верхнее течение реки. Однако за многолетний период в районе г. Орёл качество воды измени-

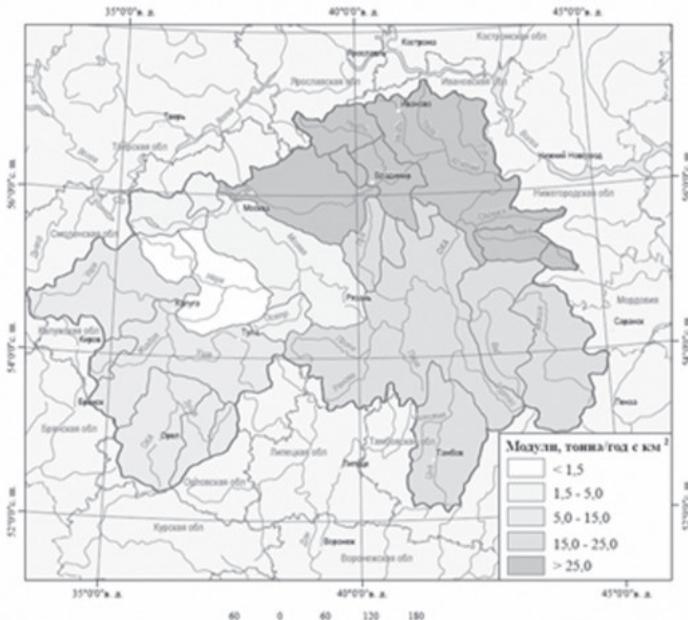


Рис. 5. Карта распределения содержания общего железа в бассейне р. Ока и график его временной динамики в створе г. Муром [7; 10]

лось от «слабо загрязнённой» (2-й класс) до «очень загрязнённой» (3-й класс, разряд «б»). Характерными загрязняющими веществами, частота превышения ПДК которых более 50% случаев, в этом случае

Таблица 2

**Характеристика качества воды на различных участках реки Оки  
(2000–2013 гг.) [2]**

Пункт наблюдений	Характерные загрязняющие вещества			
	2003 г.	2005 г.	2010 г.	2013 г.
г. Орел	Cu, NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , ЛООВ	Cu, NO <sub>2</sub> , ЛООВ	Cu, NO <sub>2</sub> , ЛООВ, PO <sub>4</sub>	Cu, NO <sub>2</sub> , ЛООВ, ТООВ
г. Коломна	Cu, Fe, NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , ЛООВ, НФПР, фенолы	Cu, Fe, NH <sub>4</sub> , NO <sub>2</sub> , ЛООВ, фенолы, НФПР	Cu, NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , ЛООВ, фенолы, НФПР	Cu, NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , ЛООВ, ТООВ
г. Дзержинск	Cu, Fe, NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , НФПР, ЛООВ	Cu, NH <sub>4</sub> , ЛООВ	Cu, NO <sub>2</sub> , ЛООВ, ТООВ	Cu, NO <sub>2</sub> , ЛООВ, ТООВ

служили медь, азот нитритный, органические вещества (по показателям БПК5 и ХПК).

Далее по течению реки качество воды ухудшается и у г. Коломна характеризуется как «грязная» (4-й класс, разряд «а, б»). При этом происходит увеличение количества характерных загрязняющих веществ за счёт фенолов, трудноокисляемых органических веществ и соединений железа. Это наиболее загрязнённый участок реки, поскольку в среднем течении Ока протекает по Московской области и испытывает высокую антропогенную нагрузку (демографическую и техногенную). В нижнем течении реки у г. Дзержинск вода также характеризуется как «грязная» (4-й класс, разряд «а»), характерные загрязняющие вещества – соединения меди, азот нитритный и аммонийный, трудно- и легкоокисляемые органические вещества (табл. 2) [8].

Изменчивость качества воды за более длительный период показывает, что в целом для реки Оки приоритетными ЗВ служат соединения меди, цинка, свинца, органических веществ (по БПК5), азот нитритный с повторяемостью превышений ПДК 56–100%. Среди ЗВ преобладает медь со среднегодовым содержанием 4 ПДК, цинк, азот нитритный и аммонийный, органические вещества (ОВ) со среднегодовыми концентрациями 1–1,6 ПДК (по БПК5). При этом максимальные концентрации достигали по соединениям меди – 8 ПДК, азоту нитритному – 7 ПДК, соединениям цинка – 4 ПДК, азоту аммонийному, нефтепродуктам – 3 ПДК, сульфатам, ОВ (по БПК5), соединениям железа, марганца, свинца, фенолам – 1,3–

2 ПДК. В устье Оки максимальная концентрация соединений меди достигает 15 ПДК, цинка – 9 ПДК, азота аммонийного, азота нитритного, соединения железа, марганца – 4 ПДК, органических веществ (по БПК5) и нефтепродуктов – 3 ПДК, сульфатов – 2 ПДК, свинца – 1,8 ПДК, никеля – 1 ПДК [7].

Качество воды в бассейне Оки варьирует от 3 класса «загрязнённая» до 4 класса «грязная». Однако резких изменений в динамике показателей качества речных вод не установлено. От истока к устью наблюдается некоторое ухудшение качества воды в соответствии с увеличением УКИЗВ, но направленных тенденций в многолетнем изменении УКИЗВ и ККВ не выявлено. Загрязнение поверхностных вод бассейна Оки связано с повышенным содержанием соединений азота, фосфора, органических веществ (по БПК5 и ХПК). Повышенное содержание указанных и прежде всего биогенных элементов в водах малых и средних рек бассейна обычно обусловлено естественными условиями формирования речного стока и антропогенной нагрузкой промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

Проведена классификация качества воды отдельных участков реки Ока и её притоков на основании анализа и комплексной оценки уровня загрязнённости воды в последние десятилетия: верхнем течении реки характеризуется как «загрязнённая», но на территории Московской области и на участке от г. Рязань до устья как «грязная», а в отдельные годы как «загрязнённая». Динамика уровня загрязнённости воды в 2000-е гг. по сравнению с предыдущим десятилетием свидетельствует об улучшении качества воды в верхнем течении реки от «грязной» до «загрязнённой», но на территории Московской области и в нижнем течении в последние годы состояние воды ухудшается до «грязной» и «очень загрязнённой» [7].

Вода притоков Оки на территории Рязанской, Владимирской, Ивановской, Нижегородской областей и республики Мордовии характеризовалась как «грязная», реже как «загрязнённая». Качество воды рек Тамбовской области (река Цна и др.) снизилось до уровня «загрязнённой» и даже «грязной» под влиянием неочищенных сточных вод г. Тамбов. Низкое качество поверхностных вод бассейнов рек Москва и Клязьма обусловлено высокой антропогенной нагрузкой на речные экосистемы.

Несмотря на некоторое уменьшение в последние десятилетия сброса сточных вод, состояние качества воды отдельных рек бассейна остаётся напряжённым. Наиболее высокой степенью загрязнения отличается бассейн реки Москва за счёт влияния мегаполиса Москвы и других городов на берегах реки, общий объём сточных вод которых превышает среднегодовой сток [1].

Воды реки Москвы характеризуются сравнительно высокой степенью загрязнённости соединениями азота, фосфатами, органическими веществами (по БПК5, ХПК), соединениями меди и железа. Содержание этих веществ в черте г. Москвы выше по сравнению с верхним течением. Ниже по течению (гг. Воскресенск – Коломна) загрязнённость воды несколько ниже, но достаточно высока. Внутригодовое распределение аммонийного и нитритного азота, ЛООВ, ХПК в верховьях реки Москвы колеблется в узком диапазоне концентраций, но ниже д. Нижнее Мячково вплоть до устья амплитуда колебаний этих веществ резко возрастает. По состоянию на 2011 г. резко увеличилось количество соединений азота (в 6–18 раз), фосфатов (в 3–9 раз), нефтепродуктов (до 3 раз). После сброса сточных вод г. Москвы максимальные концентрации этих ингредиентов отмечается в летние месяцы и октябре–ноябре, минимальные – нитритно-гоазотавапреле(0,110–0,140 мг/л),аммонийного –вавгусте(1,20–2,50 мг/л). Межсезонные колебания концентраций соединений железа наблюдаются по всему течению реки Москвы от минимальных значений в августе–сентябре (0,08–0,23 мг/л) до максимальных в декабре–январе (0,51–0,72 мг/л). В последнее десятилетие концентрации фосфатов выше норматива встречались до 100% отобранных проб, нитритного и аммонийного азота – до 70–90 и 25–50% соответственно [7].

На качество воды реки Клязьмы существенное влияние оказывают сточные воды Московской и Владимирской областей, объём которых только в 2011 г. составил 124,1 и 57,8 млн м<sup>3</sup> соответственно. Такие загрязняющие вещества воды реки как аммонийный и нитритный азот, органические вещества (по БПК5 и ХПК), соединения меди, железа, фенолы превышают ПДК от 3–5 до 1–2 в последние десятилетия. Вниз по реке наблюдается некоторое снижение среднегодового содержания ЗВ и сужается диапазон их внутригодового колебания. Однако в отдельные годы происходит рост случаев высокого загрязнения воды реки в Московской области нитритным азо-

том от 46 до 62%. За многолетний период превышение ПДК соединениями железа по длине реки происходит в 40–100% отобранных проб. Максимальные концентрации железа наблюдаются в районе г. Владимир до 3,54 мг/л. За многолетний период проявляется тенденция снижения содержания железа в воде реки. Загрязнённость фосфатами выше норматива также проявляется в течение последних десятилетий по всей длине реки, снижалась к устью. Наиболее высокий уровень содержания фосфатов характерен для реки ниже г. Щёлково, где сброс сточных вод города приводит к наиболее высокой загрязнённости воды. Здесь проявляет себя многолетний тренд увеличения концентраций соединений азота и ОВ [7].

### **Гидрохимическое состояние и загрязнение подземных вод**

Подземные воды на территории бассейна по своему качеству не вполне соответствуют питьевым нормам. Наиболее часто превышение ПДК связано с ингредиентами природного происхождения – это, прежде всего, содержание железа и показателя общей жёсткости, а также на значительных площадях не соответствуют нормам концентрации фтора, стронция, кремния, марганца, лития, общей альфа-радиоактивности. Наряду с этим, в районах интенсивного водоотбора подземных вод за счёт изменения их гидродинамического режима происходит усиление растворения водовмещающих пород и подтягивание природных некондиционных вод. В районах развития региональных депрессионных воронок на территории Московской и Тульской областей и в районах областных центров (Воронеж, Калуга, Белгород, Курск и др.) наблюдаются повышенные, и даже высокие концентрации многих природных элементов.

Загрязнение подземных вод обычно связано с коммунальными, техногенными и сельскохозяйственными объектами. Масштабы и степень загрязнения в значительной степени зависят от региональной естественной защищённости подземных вод, связанной с присутствием в зоне аэрации и кровле эксплуатируемых горизонтов обогащённых органикой почв и слабопроницаемых глинистыхложений. В связи с этим техногенное загрязнение наблюдается, прежде всего, в верхних водоносных горизонтах четвертичного и неоген-четвертичного возрастов, особенно на участках без организации зон санитарной охраны.

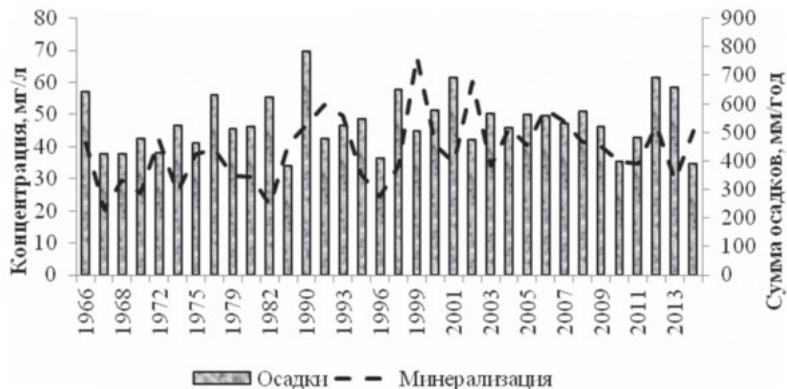


Рис. 6. Динамика минерализации подземных вод в пределах Рязанской области [12].

Загрязнения выявлены и в пределах других областей по результатам гидрохимического опробования водозаборов, они обычно носят очаговый характер. Загрязнение охватывает практически все эксплуатационные горизонты и связаны в основном с ЗВ из шламонакопителей, золоотвалов, нефтебаз, полигонов промотходов (свыше 50% участков), а также с крупными птицеводческими и животноводческими комплексами (свыше 20% участков). С объектами коммунального хозяйства (полигоны ТБО, очистные сооружения, поля фильтрации и др.) связаны свыше 10% участков загрязнения. На территории бассейна основными ЗВ служат соединения азота (50%), нефтепродукты (8 %), хлориды, сульфаты. Среди многочисленных водозаборов на подземные воды свыше 950 не соответствуют стандартам качества на питьевую воду, и это количество ежегодно возрастает. Большинство участков загрязнения подземных вод расположено на территории или вблизи крупных промышленных центров и установлено на территории Московской (280), Воронежской (122) и Курской (28) областей. Источники (15%), тяжёлые металлы (11%), фенолы (5%). Интенсивность загрязнения в большинстве случаев составляет 1–10 ПДК (свыше 53%), в пределах 10–100 ПДК (около 30%), для 15% участков ПДК превышают 100.

Только в Рязанской области более 3,5 тыс. скважин эксплуатируют подземные воды каменноугольных и девонских отложений. Качество подземных вод в основном соответствует питьевым стандартам. Однако в ряде водозаборов выявлено превышение норм

ПДК по железу общему, магнию, марганцу и цинку [12]. Кроме того, к распространённым ЗВ с превышением ПДК относятся также азотсодержащие соединения, что может говорить о загрязнении подземных вод ОВ. Со стоками промпредприятий в источники водоснабжения часто попадают тяжёлые металлы.

### **Заключение**

Химический состав природных вод бассейна реки Оки в естественных условиях зависит от ландшафтно-климатических условий водосборов рек и состава водовмещающих пород водоносных горизонтов и помимо этого определяется сменой генетических составляющих водного стока, его гидрологических фаз и водности лет. Анализ многолетней динамики качества природных вод бассейна не выявил определённых тенденций. Верховья реки и её участки вблизи малонаселённых пунктов отличаются практическим отсутствием антропогенного загрязнения. Однако по мере роста населения и антропогенной нагрузки на водные объекты степень загрязнённости речных вод в большинстве пунктов наблюдений в последние годы характеризуется различными разрядами 3-го и 4-го класса качества, а в пределах больших экономически развитых городов даже 5 классом качества в отдельные годы.

Состояние качества воды отдельных рек бассейна остаётся напряжённым. Наиболее высокой степенью загрязнения отличается бассейны рек Москва и Клязьма за счёт влияния мегаполиса Москвы и предприятий Московской и Владимирской областей, сточные воды которых превышает среднегодовой сток рек.

Проведена классификация качества воды отдельных участков Оки и её притоков на основании анализа и комплексной оценки уровня загрязнённости воды в последние десятилетия: верхнее течение реки характеризуется как «загрязнённая», но на территории Московской области и на участке от г. Рязань до устья – как «грязная». Пространственная изменчивость напрямую зависит от уровня антропогенной нагрузки на конкретный участок водотока, поэтому территория Московской области – нижнее течение – в последние годы состояние воды ухудшается до «грязной» и «очень загрязнённой».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамова Е.А. Оценка уровня антропогенной нагрузки на бассейн реки Оки в пределах Московской области // Электронный журнал «Вестник Московского государственного областного университета», 2011. /2/ География. С. 20.
2. Гришанова Ю.С., Решетняк О.С. Оценка влияния крупного города на качество воды реки Ока (на примере г. Дзержинск) // Актуальные проблемы наук о Земле. Сб. тр. научн. конф. студ. и мол. учёных с международным участием. Ростов-н/Д: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 335–337.
3. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. №3, 2015. С. 97–108.
4. Методические указания РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязнённости поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. 49 с.
5. Никаноров А.М. Региональная гидрохимия. Ростов-н/Д: Изд-во «НОК», 2011. 388 с.
6. Никаноров А.М. Фундаментальные и прикладные проблемы гидрохимии и гидроэкологии. Ростов-н/Д: Изд-во ЮФУ, 2015. 735 с.
7. Никаноров А.М., Минина Л.И. и др. Динамика качества поверхностных вод крупных речных бассейнов Российской Федерации. Ростов-н/Д: Изд-во ГХИ, 2016. 294 с.
8. Решетняк О.С., Лямперт Н.А., Гришанова Ю.С. Пространственная изменчивость химического состава и качества воды р. Ока // Материалы научной конференции с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». Ростов-на-Дону, 2015. С. 278–282.
9. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: формирование, распределение, использование // Под ред. Р.Г. Джамалова, Н.Л. Фроловой. М.: ГЕОС. 2015. 320 с.
10. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Ока. Москва: Московско-Окское БВУ, 2010. 152 с.
11. Kirchner J.W. A double paradox in catchment hydrology and geochemistry // Hydrological Processes. V. 17., 2003. P. 871–874.
12. Геолого-гидрологические условия Рязанской области // Геоцентр-Москва URL: <http://geocentr-msk.ru/content/view/191> (дата обращения: 25.08.2016). Режим доступа: свободный.

## АВТОРЫ СТАТЕЙ

**АДЖИЕНКО Георгий Владиславович** – младший научный сотрудник лаборатории охраны вод ИВП РАН. Область научных интересов – международное и национальное природоохранное законодательство, системы экологического менеджмента на предприятиях.

**БАКАЕВА Елена Николаевна** – известный специалист в области исследований антропогенных воздействий (загрязнения, закисления и др.) на водные объекты, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН. Широко известны результаты автора в области исследования внутриводоёмных химико-биологических процессов, влияния биогеохимических особенностей донных отложений на систему «вода – донные отложения – гидробионты».

**БОЛГОВ Михаил Васильевич** – ведущий отечественный специалист в области стохастической гидрологии, доктор технических наук, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод ИВП РАН.

Основные направления исследований связаны с изучением стохастических свойств гидрометеорологических процессов, сезонных и многолетних колебаний речного стока, экстремальных гидрологических ситуаций. Предложенные автором методы основаны как на классических результатах теории вероятности, так и на новых подходах к районированию гидрометеорологических характеристик, использующих сочетание географических и стохастических представлений об их однородности и изменчивости. Болговым выполнен цикл работ по экспериментальному изучению гидрологического режима и свойств почв на урбанизированных территориях, разработаны вероятностно-детерминированные методы прогноза подтопления территорий.

На основе разработанных Болговым методов и моделей предложены подходы к решению ряда актуальных научно-прикладных задач, таких как вероятностное прогнозирование уровня Каспийского моря и других замкнутых озёр; оценка надёжности функционирования Волжского каскада гидроузлов в условиях затяжных маловодий; водообеспечение атомных электростанций на основе схем комбинированного использования поверхностных и подземных вод. В настоящее время автором разрабатываются методы оценивания и прогнозирования гидрологического режима в условиях неопределённости климатических изменений, исследуются проблемы водопользования на трансграничных реках и др.

Болгов – член Национального комитета Российской Федерации по Международной гидрологической программе ЮНЕСКО, член Совместной Российско-Китайской комиссии по рациональному использованию и охране трансграничных вод, член экспертного совета при комитете Государственной думы по природным ресурсам и ряда других научно-технических и экспертных советов; член Учёного и Диссертационного советов Института, Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», член редколлегий журналов «Водные ресурсы», «Метеорология и гидрология» и др.

При участии Болгова разработана Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г. (утверждена Правительством РФ в 2009 г.) и проект Федеральной программы по модернизации водохозяйственного комплекса РФ.

По результатам исследований опубликовано (в соавторстве) более 150 научных работ, в том числе 5 монографий: Д.Я. Раткович, М.В. Болгов. «Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна». М., ИВП РАН, 1997, 262 с.; М.В. Болгов, В.М. Мишон, Н.В. Сенцова. «Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения», М., Наука, 2005, 318 с.; М.В. Болгов, Г.Ф. Красножон, А.А. Любушин. «Каспийское море. Экстремальные гидрологические события». М., Наука, 2007, 381 с.; М.В. Болгов, И.О. Сарманов, О.В. Сарманов. «Марковские процессы в гидрологии», М., ИВП РАН, 2009, 210 с.; М.В. Болгов, Е.А. Коробкина, Н.В. Осипова. «Предотвращение катастрофических паводков и обеспечение безопасности территории Крымского района краснодарского края». М., ИВП РАН, 2013, 34 с.

**БРЕЗГУНОВ Вячеслав Сергеевич** – специалист в области изотопных методов исследования природных вод, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. Основные направления деятельности связаны с развитием экспериментальных и теоретических методов исследования водообмена с помощью природных изотопных индикаторов. Автор около 100 печатных работ.

**БРЕХОВСКИХ Вадим Феодосьевич** – ведущий отечественный специалист в области гидрофизики и тепло- и массопереноса в водных объектах, доктор технических наук, профессор, руководитель группы внутриводоемных процессов ИВП РАН

Научная деятельность посвящена исследованию процессов переноса растворённых и взвешенных веществ в водных объектах, теоретическому и экспериментальному изучению связи гидрологического и кислородного режимов рек, испытываю-

щих большую антропогенную нагрузку. Большое место в работах Бреховских занимают исследования процессов распространения загрязняющих веществ, попадающих в реки и водоёмы в результате аварийных сбросов. Особое внимание уделяется исследованиям процессов переноса примесей на границе «вода – донные отложения»: накопление и вынос из донных отложений биогенных и токсичных веществ, вопросы вторичного загрязнения водных масс при взмучивании донных отложений под воздействием природных и антропогенных факторов и др.

Под руководством и при личном участии Бреховских выполнен цикл оригинальных экспериментальных работ и расчётов по изучению роли гидробионтов в процессах переноса растворённых и взвешенных веществ в воде и донных отложениях, в частности влияния макробентоса на размыв связных грунтов.

Под руководством Бреховских подготовлено 5 кандидатов наук. Член Учёного совета Института, Диссертационного совета при ИВП РАН, Научного совета Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши». Награждён Почётной грамотой Российской академии наук и Профсоюза работников Российской академии наук.

Автор и соавтор более 200 научных трудов, в том числе 6 монографий: Бреховских В.Ф Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоёмов. М., Наука. 1988, 168 с.; Иваньковское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны М., Наука 2000. 344с. (Абакумов В.А., Ахметьева Н.П., Бреховских В.Ф. и др.); Бреховских В.Ф, Волкова З.В, Колесниченко Н.Н Проблемы качества поверхностных вод в бассейне Северной Двины. М., Наука, 2003, 233 с.; Казмирук В.Д, Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф. Застраивающие водотоки и водоёмы Динамические процессы формирования донных отложений М., Наука, 2004, 310 с.; Бреховских В.Ф., Казмирук Т.Н., Казмирук В.Д. Донные отложения Иваньковского водохранилища: состояние, состав, свойства. М., Наука, 2006, 176 с.; Бреховских В.Ф., Казмирук В.Д., Вишневская Г.Н. Биота в процессах массопереноса в водных объектах. М., Наука, 2008. 315 с.

**БУХАРИЦЫН Пётр Иванович** – ведущий отечественный специалист в области гидрологии Каспийского моря и устьевых областей, доктор географических наук, профессор, руководитель группы исследований экологических проблем в дельте р. Волги ИВП РАН в г. Астрахань.

Область научных интересов – морская гидрофизика, ледовые процессы в реке и море, их расчёт и прогнозирование, авиационные и космические наблюдения за ледяным покровом, другими опасными природными явлениями, рациональное использование водных ресурсов, сохранение биологического разнообразия в регионе Каспийского моря и прилегающих территорий, общая и морская экология.

Под руководством и при непосредственном участии Бухарицына проводятся уникальные экспедиционные исследования слабоизученных гидрологических и ледовых процессов в Каспийском море. Результаты этих работ используются администрацией Астраханской области и другими организациями для повышения эффективности хозяйственной деятельности на российской части шельфа Каспийского моря, обеспечения безопасности судоходства по Волго-Каспийскому каналу и на Северном Каспии, при проведении рыбного промысла, морских нефтетразведочных работ и др.

Профессор кафедры «Инженерная экология и природообустройство» Астраханского государственного технического университета. Под его руководством защищено 5 кандидатских диссертаций.

Председатель Астраханского регионального отделения «Русского географического общества», имеет государственные и общественные награды (в т.ч. международные). Награждён медалью м. М.В. Ломоносова Международной академии наук по экологии и безопасности жизнедеятельности, удостоен почётных званий Всероссийского общества охраны природы и Российской академии естественных наук.

Автор и соавтор более 400 научных работ (в том числе 10 коллективных монографий и двух книг), 30 учебно-методических пособий, лекций, учебных видеофильмов по краеведению, опубликованных картографических работ (электронный атлас ледовых образований Каспийского моря; гидрологические карты в Географическом атласе Астраханской области).

В последние годы Бухарицыным опубликованы монографии: Бухарицын П.И., Болдырев Б.Ю., Новиков В.И. Система гидрометобеспечения безопасности мореплавания на Каспии. Palmarium Academic Publ., 2015, 329 с.; Бухарицин П.И., Киен Нгуен Данг. Влияние температуры воды на состояние популяции и промысел тунца в ЮКМ. Прогнозирование вылова тунца в зависимости от океанологических и экономических факторов. Lambert Academic Publ., 2015.

**ВАВИЛИН Василий Александрович** – ведущий специалист в области математического моделирования микробиологичес-

ких процессов, доктор физико-математических наук, руководитель группы моделирования продукционно-деструкционных процессов ИВП РАН.

Всемирную известность получили работы Вавилина, связанные с изучением механизма автоколебательной химической реакции Белоусова-Жаботинского и периодической химической реакции Брея-Либавского, математического моделирования процессов биологической очистки сточных вод, анаэробных процессов. Под руководством Вавилина и при его непосредственном участии в середине 1990-х гг. была разработана первая компьютерная модель анаэробных процессов "МЕТАН" с дружественным интерфейсом. Для моделирования химического и биологического разложения твёрдых отходов созданы модели с распределёнными параметрами. Исследованы различные явления пространственной динамики во время деградации твёрдых бытовых отходов (значение центров инициации метаногенеза, отрицательные и положительные эффекты перемешивания раствора на скорость процесса, разложение эфиров фталевой кислоты в метаногенных условиях и т.д.). Получены новые результаты, описывающие перераспределение лёгких и тяжёлых изотопов в результате микробиологического разложения различных субстратов.

Член Международной ассоциации качества воды, Международной ассоциации по водным ресурсам, специализированной группы по моделированию анаэробных процессов Международной Водной Ассоциации, член Российской академии естественных наук, член Учёного совета Института и Диссертационных советов при ИВП РАН и Физическом факультете МГУ.

Автор и соавтор более 110 статей в реферируемых журналах, 5 монографий: Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической обработки сточных вод активированным илом. М., Наука, 1979, 119 с.; Вавилин В.А. Нелинейные модели биологической очистки сточных вод и процессов самоочищения рек. М., Наука, 1983. 159 с.; Вавилин В.А. Время оборота биомассы и деструкция органических веществ в системах биологической очистки. М., Наука, 1986. 144 с.; Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытов С.В. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов. М., Наука, 1993. 202 с.; Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnii S. V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H. and Vavilin V.A. "Anaerobic Digestion Model No.1." Scientific and Technical Report No.13. IWA Publishing, Cornwall, UK, 2002.

Вавилин – один из наиболее цитируемых в изданиях базы Web of Science отечественных специалистов в области математического моделирования микробиологических процессов. Входит в престижный список «Кто есть кто в Российской науке» <http://expertcorps.ru/science/whoiswho>, объединяющий учёных из всех областей науки, имеющих наибольшее число цитирований в базе Web of Science.

**ВЕНИЦИАНОВ Евгений Викторович** - ведущий отечественный специалист в области математического моделирования физико-химических процессов, теории мониторинга водных объектов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией охраны вод ИВП РАН.

Широкую известность получили результаты автора, связанные с анализом физико-химических процессов в водных объектах и существенно расширившие представление о процессах формирования и трансформации качества природных вод, возможности оптимизации водоохраных мероприятий на водных объектах. Им впервые разработан метод оптимизации системы водоохраных мероприятий в бассейне реки с учётом экологических требований и экономической эффективности. Предложен и запатентован интегрально-сорбционный метод мониторинга аварийных сбросов в водные объекты («Экологический полицейский»).

Большое внимание в работах Веницианова уделяется прикладным вопросам, связанным с системой водоохраных мероприятий в бассейне р. Волги, повышением эффективности функционирования водохозяйственной системы водоснабжения г. Москвы, оптимизации правил управления водохранилищами Москворецкой системы.

Веницианов ведёт большую педагогическую деятельность в Международном университете природы, общества и человека («Дубна») и в ИВП РАН, под его руководством защищено 5 кандидатских диссертаций.

Член Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», Учёного совета Института, докторантской комиссии при ИВП РАН и биологическом факультете МГУ им М.В. Ломоносова; руководитель секции охраны вод Общественного совета по экологии при Департаменте природопользования Правительства Москвы, возглавляет Комитет по охране природы Московского союза научных и инженерных организаций, член Научно-технического совета МГУП «Мосводоканал».

Опубликовано около 200 научных работ, из них 7 монографий, в том числе: Веницианов Е.В., Комаров И.К., Коптева Е.Н. и др. Организационно-экономический механизм рационально-

го водопользования. / Научн. ред. И.К.Комаров. ИВП РАН и КЕПС РАН. Москва. Изд. «Вымпел». 1997. 300 с.; Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжёлых металлов в природных водах. Екатеринбург, Изд. РосНИИВХ, 2002, 236 с.; Веницианов Е.В., Винниченко В.Н., Гусева Т.В. и др. Экологический мониторинг: шаг за шагом. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003, 252 с.; Щеголькова Н.М., Веницианов Е.В. Охрана загрязненной реки: интенсификация самоочищения и оптимизация водоотведения. М., РАСХН, 2011, 388 с.

**ВИШНЕВСКАЯ Галина Николаевна** – специалист в области гидробиологии, кандидат физико-математических наук. Участовала в выполнении цикла работ по изучению роли гидробионтов в процессах переноса растворённых и взвешенных веществ в воде и донных отложениях. Имеет более 70 научных работ.

**ВОЛКОВА Зинаида Васильевна** – специалист в области гидрологии, гидрофизики, гидрохимии, экологии, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. В последнее время занимается исследованиями состояния загрязнения вод и донных отложений Нижней Волги. Автор и соавтор более 100 научных трудов, в том числе 4 монографий.

**ГЕЛЬФАН Александр Наумович** – ведущий специалист в области математического моделирования гидрологических процессов в речных бассейнах, доктор физико-математических наук, заместитель директора ИВП РАН по научной работе.

Научные достижения Гельфана до начала 2000-х гг. тесно связаны с именем его учителя – профессора Л.С. Кучмента. В эти годы ими были выполнены пионерные и широко цитируемые за рубежом работы по физико-математическому моделированию накопления и таяния снега под пологом леса, инфильтрации воды в мёрзлую почву, разработаны методы ассимиляции спутниковых данных о снежном покрове в моделях формирования весеннего половодья, определения параметров физико-математических моделей при недостаточности гидрологических наблюдений, обоснована гипотеза самоподобия поля снежного покрова, и предложен основанный на этой гипотезе метод описания подсеточных эффектов в моделях гидрологического цикла.

Из научных результатов, полученных Гельфаном в последние годы, выделяются первые в мире исследования влияния внутренней стохастической изменчивости атмосферы на неопре-

делённость гидрологических проекций изменения климата, новый метод анализа и оценки предсказуемости гидрологических систем, методы анализа физических механизмов чувствительности экстремальных гидрологических явлений к изменениям климата, ансамблевого долгосрочного прогноза сезонного стока рек. Особое место в исследованиях автора занимает создание научных основ и разработке технологий информационной поддержки управления риском наводнений на основе физико-математических моделей формирования паводкового стока и гидродинамических моделей движения воды в руслах рек.

Заведующий кафедрой водных ресурсов ИВП РАН, в должностях профессора читает курс лекций на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Под руководством Гельфана защищены 2 диссертации.

Член редколлегий журналов «Водные ресурсы», «Russian Journal of Earth Sciences», журналов Европейского союза геофизических наук: «Hydrology and Earth System Sciences» и «Earth System Science Data». Секретарь Комиссии по гидрологии снега и льда Международной Ассоциации Гидрологических Наук.

Автор более 100 научных работ, из них 2 монографии: Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М. Наука, 1993, 104 с.; Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М., Наука, 2007, 294 с.

Гельфан – один из наиболее цитируемых в изданиях базы Web of Science отечественных специалистов-гидрологов. Входит в престижный список «Кто есть кто в Российской науке» <http://expertcorps.ru/science/whoiswho>, объединяющий учёных из всех областей науки, имеющих наибольшее число цитирований в базе Web of Science.

Вся научная деятельность Гельфана, начиная с аспирантуры до настоящего времени, связана с Институтом водных проблем РАН.

**ГРИЦУК Илья Игоревич** – специалист в области изучения и моделирования транспорта наносов в подлёдных потоках, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

**ГУСЕВ Евгений Михайлович** – ведущий специалист в области изучения режима и ресурсов почвенных вод, моделирования процессов тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой, доктор биологических наук, заведующий лабораторией физики почвенных вод ИВП РАН.

Гусевым совместно с О.Н. Насоновой разработана наиболее известная в мире отечественная модель взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP – неизменный участник масштабных международных экспериментов по моделированию потоков тепла и влаги в системе «почва-растительность-атмосфера» (Man & Biosphere, PILPS, MOPEX, Rhona-AGG, GSWP, ALMIP, SnowMIP и других). В работах Гусева предложены новые методы оценки эффективности различных приёмов воздействия на режим почвенных вод и водообеспеченность растительного покрова. Его работы внёсли существенный вклад в развитие исследований А.И. Будаговского – основателя учения о почвенных водах. В настоящее время Гусевым совместно с О.Н. Насоновой разрабатывается комплекс со-пряжённых гидрологических и климатических моделей формирования теплового и водного режимов системы «суши – атмосфера».

Результаты исследований Гусева отмечены многими профессиональными наградами, в их числе медаль Международного биографического центра (IBC) при Кэмбриджском Университете («IBC Cambridge Blue Book») в 2007 г., медаль «IBC Lifetime achievement award» в 2008 г.

Член Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», Учёного и Диссертационного советов ИВП РАН, Исследовательской коллегии советников Американского биографического института; редколлегии международного журнала «Journal of Hydrology and Hydromechanics».

Автор и соавтор более 200 публикаций, из них 3 монографии: Гусев Е.М. Формирование режима и ресурсов почвенных вод в зимне-весенний период. М., Наука, 1993, 158 с.; Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М., Наука, 2010, 328 с.; Гусев Е.М. Ресурсы почвенных вод и экология наземного растительного покрова. Концепции, эксперимент, расчёты. Saarbrücken. Palmarium Academic Publishing, 2012, 116 с.

В 2008 году за цикл работ, посвящённых исследованию влаго- и теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой и опубликованных в журналах издательства МАИК «НАУКА»/Интерпериодика, Е.М. Гусеву совместно с О.Н. Насоновой была присуждена Главная премия этого издательства.

Гусев наиболее цитируемый в изданиях базы Web of Science отечественный специалист в области исследования и моделирования тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. Входит в престижный список «Кто есть кто в Российской науке» <http://expertcorps.ru/science/whoiswho>, объединяю-

щий ученых из всех областей науки, имеющих наибольшее число цитирований в базе Web of Science.

**ДАНИЛОВ-ДАНИЛЬЯН Виктор Иванович** – всемирно известный специалист в области экономики природопользования, экономико-математического моделирования, теории устойчивого развития, управления водными ресурсами, экологии и охраны окружающей среды, член-корреспондент РАН, доктор экономических наук, профессор, директор ИВП РАН.

Широкую известность получили работы Данилова-Данильяна по оценке состояния рынков воды и водохозяйственных услуг в РФ и мире. Им исследованы условия экологически безопасного размещения экспортно ориентированных водоёмных производств на территории РФ, сформулированы предложения по механизмам участия в международной торговле водой. Разработана программа реализации конкурентных преимуществ водоресурсного потенциала страны как важнейшего элемента рационального природопользования, обоснованы приоритетные направления обеспечения долгосрочного присутствия РФ в системе принятия глобальных решений в области рационального использования водных ресурсов.

Автором разработана концепция «Водные ресурсы как стратегический фактор развития экономики России на долгосрочную перспективу», в которой обоснована необходимость усиления роли водохозяйственного комплекса в народном хозяйстве и разработки стратегий водопользования на фундаментальной научной основе с учётом обеспечения экономики страны водными ресурсами и прогноза потребностей мировой экономики в водоёмной продукции. Основные положения разработанной концепции легли в основу утверждённой Правительством РФ «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года», а также федеральной целевой программы развития водохозяйственного комплекса России, направленной на реализацию Водной стратегии.

Данилов-Данильян успешно совмещает научно-исследовательскую деятельность с преподаванием в крупных вузах страны: он заведует кафедрой «Отраслевое и природно-ресурсное управление» факультета государственного управления МГУ им. М.В. Ломоносова; с 2005 г. возглавляет кафедру «Экология и управление водными ресурсами» на экологическом факультете РУДН; с 2010 г. руководит Международной кафедрой ЮНЕСКО «Управление водными ресурсами и экогидрология». Под руководством Данилова-Данильяна защищено более 40 кандидатских диссертаций.

Заместитель академика-секретаря бюро Отделения наук о Земле РАН, председатель Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», выполняет большую научно-организационную работу в составе российских и международных комитетов, комиссий. Главный редактор журнала «Водные ресурсы», член редколлегии журнала «Экологическое планирование и управление» и других журналов.

Лауреат премии Правительства Российской Федерации «За разработку и создание природоохранного комплекса контроля экологического состояния водной среды» (1996 г.), лауреат национальных экологических премий (2006, 2013 гг.), награждён правительственные наградами.

Автором опубликовано более 600 научных работ, из них 36 монографий. Результаты его фундаментальных исследований получили заслуженное признание российских и зарубежных учёных и существенно повлияли на формирование современных научных представлений по широкому кругу вопросов. В числе наиболее значимых публикаций за период деятельности в Институте: Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Рейф И.Е. Перед главным вызовом цивилизации М., ИНФРА-М, 2005; Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты. М., Наука. 2006; Danilov-Danilyan V.I., Losev K.S., Reyf I.E. Sustainable Development and the Limitation of Growth. Springer/Praxis. London, Chichester, 2009; Данилов-Данильян В.И. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России. М., Общественная палата РФ, 2009; Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М., Научный мир, 2010; Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В.Г. и др. Водные ресурсы и качество вод: состояние и проблемы управления М., РАСХН, 2010; Данилов-Данильян В.И., Пряжинская В.Г. и др. Экономические и территориальные аспекты управления водохозяйственным комплексом России М., РАСХН, 2013; Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Согласование стратегий трансграничного водопользования. М., Изд-во «Энциклопедия», 2016.

Монография В.И. Данилова-Данильяна, К.С. Лосева «Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты» удостоена «Национальной экологической премии – 2006» Фонда им. В.И. Вернадского и Комитета по экологии Государственной думы.

В 2013 г. Данилов-Данильян в составе авторского коллектива удостоен Главной премии Международной академической издательской компании «Наука/Интерпериодика» за лучшую публикацию в издаваемых ею журналах.

**ДЕБОЛЬСКАЯ Елена Ивановна** – известный специалист в области гидродинамики открытых и подледных потоков, доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики РУДН, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

Ею обобщены данные по ледовым явлениям на территории Российской Федерации, обоснованы методики прогнозирования возможных катастрофических ситуаций в зимний период, связанных с распространением загрязняющих веществ в водотоке при активных ледовых явлениях. Разработан комплекс математических моделей, позволяющий определить наиболее значимые факторы, влияющие на формирование заторов льда; дать прогноз условий их возникновения и катастрофических подъёмов уровня воды; оценить возможные деформации русла, вызванные действием заторов; обосновать практические рекомендации по предотвращению зимних наводнений и смягчению чрезвычайных экологических ситуаций.

Предложения Дебольской включены в Строительные нормы и правила для проектирования гидротехнических сооружений и Федеральные нормативные документы, регламентирующие оценку последствий воздействия ледовых затруднений на экологию водных объектов.

Автор и соавтор 88 научных работ, включая 2 монографии: Дебольская Е.И. «Динамика водных потоков под ледяным покровом». Изд-во Московского государственного университета природообустройства. 2003. 263 с.; Дебольская Е.И. «Математические модели ледовых заторов и их последствий» Москва, изд. РУДН, 2014, 131с.

**ДЕБОЛЬСКИЙ Владимир Кириллович** – ведущий отечественный специалист в области гидравлики и инженерной гидрологии, изучения и моделирования транспорта наносов, береговых деформаций, термического режима водных объектов, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией динамики русловых потоков и ледотермики ИВП РАН.

Разработанные под руководством Дебольского и при его непосредственном участии методы гидравлических и гидродинамических расчётов вошли в нормативные документы: Строительные нормы и правила (СНИП), Указания по гидрологическим расчётам при проектировании водохранилищ, а также в учебники для строительных специальностей вузов.

Эксперт комитетов по экологии Государственной Думы РФ и Федерального собрания РФ, член Диссертационного совета при ИВП РАН, член Учёного совета Института и редколлегии журнала «Водные ресурсы».

Более 50 лет Дебольский преподаёт гидравлику и гидротехнику в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ) и Российском университете дружбы народов (РУДН). Под его руководством подготовлено более 20 кандидатов наук.

Автор и соавтор более 100 научных работ, из них 2 монографии: Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М., Наука, 1980, 216 с.; Россинский К.И., Дебольский В.К., Зайдлер Р. и др. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М., Наука, 1994, 303 с.

**ДЖАМАЛОВ Раульд Гамидович** – ведущий специалист в области гидрогеологии, региональной оценки водных ресурсов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий лабораторией гидрогеологических проблем охраны окружающей среды ИВП РАН.

Научные исследования посвящены теоретическим и методическим вопросам изучения и картирования подземного стока как компонента окружающей среды и общих водных ресурсов, исследованиям взаимодействия подземных, поверхностных и морских вод, региональной оценке подземного стока в моря и океаны, роли подземных вод в водном балансе крупных регионов.

Широкую известность приобрели работы автора в области морской гидрогеологии. В соавторстве с И.С. Зекцером им разработаны методы количественной оценки поземного стока в моря, проведена региональная оценка субмаринного подземного стока по земному шару в целом, отдельным континентам, бассейнам морей и океанов.

Под руководством Джамалова исследованы процессы загрязнения подземных вод под влиянием рассредоточенных источников, уточнены их масштабы, получены оценки и прогноз воздействия на гидрогеологические системы.

Джамалов ведет активную преподавательскую деятельность в Международном Университете «Дубна» и в Российском университете дружбы народов. Под его руководством защищены 2 кандидатские диссертации.

Председатель Секции гидрологических наук при Национальном геофизическом комитете России, эксперт подкомитета Госдумы РФ по водным ресурсам, ученый секретарь диссертационного совета при ИВП РАН, член Учёных советов ИВП РАН и университета «Дубна»; член редколлегий журналов «Водные ресурсы», «Недропользование – XXI век», член-корреспондент Российской академии естественных наук, член Аме-

риканского института гидрологии. Фундаментальные результаты Джамалова отмечены премией РАН имени Ф.П. Саваренского.

Автор и соавтор более 190 научных статей, 2-х крупных картографических изданий (Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России, Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России) и 14-ти монографий, в том числе: Джамалов Р.Г. Подземный сток Терско-Кумского артезианского бассейна. Изд-во Наука, М., 1973; Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Месхетели А.В. Подземный сток в моря и Мировой океан. Изд-во Наука, М., 1977; Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Месхетели А.В. Подземный водообмен суши и моря. Гидрометеоиздат, Л., 1984; Dzhamalov R. G. Zektser I.S. Role of groundwater in the hydrological cycle and in continental water balance. UNESCO, Paris, 1988; Джамалов Р.Г., Зекцер И.С. Подземные воды в водном балансе крупных регионов. Изд-во Наука, М., 1989; Dzhamalov R.G., Zektser I.S. Submarine Groundwater. CRC Press, USA, 2006.

**ДОБРОВОЛЬСКИЙ Сергей Гавриилович** – ведущий специалист в области глобальной гидрологии, оценки гидрологических последствий изменения климата, доктор географических наук, заведующий лабораторией глобальной гидрологии ИВП РАН.

Широкую известность получили работы Добровольского в области глобальной гидрологии, изменений гидрологических процессов на поверхности суши в климатическом и промежуточных масштабах времени. Предложены новые методы оценки возможных изменений речного стока на отдалённую перспективу вследствие парникового эффекта с учётом параметров неопределённости оценок вследствие различных факторов, в том числе возможных естественных изменений глобального климата. Под руководством Добровольского и при непосредственном участии созданы и анализируются компьютерные базы данных по годовому, максимальному и минимальному речному стоку (на всех материках), разработана и постоянно пополняется база данных по наводнениям в мире и России (в настоящее время она содержит информацию по более чем 3000 наводнений в мире, в т.ч. по 550 наводнениям в России). Разрабатываются объединённая база данных по параметрам проточных озёр и изменениям стока озёрных рек, а также база данных по водохранилищам мира и изменениям стока рек, на которых имеются крупные гидротехнические сооружения.

Член Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», Учёного и Диссертационного советов Института водных проблем

РАН; редколлегии журнала «Водные ресурсы», Российского географического общества.

Автор более 100 научных трудов, в том числе монографий: Добровольский С.Г. Аномалии глобального тепловлагообмена. М., Советский геофизический комитет, 1991, 128 с.; Dobrovolski S.G. Global climatic changes in water and heat transfer-accumulation processes. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1992, 282 p.; Dobrovolski S. G. Stochastic climate theory. Springer, Heidelberg et al., 2000, 296 p.; Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М., ГЕОС, 2002, 232 с.; Добровольский С.Г., Истомина М.Н. «Наводнения мира». М., Геос, 2006, 259 с.; Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М., Геос, 2011, 660 с.

**ДОЛГОПОЛОВА Елена Николаевна** – известный специалист в области изучения турбулентной структуры открытого и подлёдного речного потока, моделирования взаимодействие потока с подвижным дном, процессов проникновение морских вод в устья рек и смешения пресных и солёных вод в низовьях рек, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

Член Международной Ассоциации Гидравлических исследований (IAHR), научный редактор журнала «Водные ресурсы». В 2005–2011 гг. читала курсы лекций в Московском государственном строительном университете по специальностям «Гидравлика» и «Гидравлика трубопроводов». Награждена Международной академической издательской компанией «Наука/Интерпериодика» премией за лучшую публикацию в журнале «Водные ресурсы» в 1999 г. В 2010 г. награждена почётной медалью Московского государственного строительного университета «За заслуги в строительном образовании и науке». Автор более чем 120 научных работ.

**ЗЫРЯНОВ Валерий Николаевич** – ведущий специалист в области геофизической гидродинамики, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией гидродинамики ИВП РАН. Область научных интересов – динамика морских течений, вихри над неровностями рельефа дна, обтекание островов, трансформация приливных волн на мелководье, остаточные течения в окраинных морях, подлёдные течения, термодинамика льда, движение жидкости в пористых средах.

Всемирную известность получили работы Зырянова по развитию гидродинамической теории градиентно-вязкого режима

течения жидкости. На базе этой теории Зыряновым обнаружены новые явления, в частности эффект нелинейной накачки уровня в прибрежной зоне и в устьях рек приливных морей, развита общая математическая теория этого эффекта для нелинейных параболических дифференциальных уравнений, который получил название пампинг-эффекта. Теория пампинг-эффекта применена для описания интрузии морских вод в устья приливных рек, роста льда на озёрах и водоёмах суши, теплообмена с глубинными слоями океана, она позволила открыть новый тип донных песчаных макроформ – инверсные дюны, описать новый механизм остаточного перемещения мелкодисперсной взвеси в зоне взаимодействия морских и речных вод.

Под руководством Зырянова подготовлено 6 кандидатов наук и один доктор наук.

Автор поддерживает тесные научные контакты с ведущими гидродинамическими центрами: Институтом механики г. Гренобль (Франция) и Университетом Данди (Великобритания). Профессор кафедры водных ресурсов ИВП РАН; член Европейского общества механиков ЕВРОМЕХ, член Научного совета Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши», Учёного совета Института, докторской диссертационной комиссии при ИВП РАН и Институте океанологии РАН; заместитель главного редактора журнала «Водные ресурсы», член редколлегии журнала «Процессы в геосредах».

Автором опубликовано более 100 научных работ, из них 2 монографии: Зырянов В.Н. Теория установившихся океанических течений. Л., Гидрометеоиздат, 1985, 248 с.; Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. М., ИВП, 1995, 238 с.

**ИОНОВ Дмитрий Николаевич** – старший инженер лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики ИВП РАН.

**КРЕМЕНЕЦКАЯ Екатерина Рифовна** – специалист по разработке методов исследования внутриводоёмных процессов, оценки влияния антропогенных факторов на эти процессы, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. Изучает особенности кислородного режима и режима взвешенного вещества в Можайском и Иваньковском водохранилищах. Получала поддержку грантов РФФИ и президента РФ. Имеет более 40 научных работ.

**КУЗЬМИНА Жанна Вадимовна** – ведущий отечественный специалист в области гидрогенной динамики экосистем, оценки трансформации наземных экосистем при изменении водно-

го режима территорий в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений, доктор географических наук, заведующая лабораторией динамики наземных экосистем под влиянием водного фактора ИВП РАН.

Основные направления научной деятельности – динамика экосистем, влияние климатических и гидрологических изменений на экосистемы, оценка динамических изменений экосистем и их компонентов, биоразнообразие, охрана природы. Кузьминой получены новые результаты в области изучения динамических изменений наземных экосистем поймы и дельты Нижней Волги под влиянием зарегулирования речного стока и климатических флюктуаций, влияния климатических и гидрологических изменений на трансформацию естественных и антропогенно нарушенных в результате мелиорации экосистем зоны южной тайги.

Член Русского географического общества и Российской экологической академии, научно технического совета (НТС) секции охраны водных экосистем «Центрального Управления по рыболовству и нормативам по сохранению, воспроизводству водных биологических ресурсов и акклиматизации». Главный редактор журнала «Экосистемы: экология и динамика», заместитель главного редактора журнала «Аридные экосистемы».

Автор более чем 120 научных работ, в том числе, соавтор монографии Novikova N.M., Kuz'mina J.V. Monitoring of the vegetation in conditions of the Aral Sea ecological crisis. Moscow, RAAS, 2008, 218 p.

**КУРБАТОВА Ирина Евгеньевна** – ведущий отечественный специалист в области разработки методов и технологий исследования водных объектов и их бассейнов с использованием данных спутникового зондирования поверхности Земли, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

Основные научные достижения связаны с разработкой методов оценки геоэкологического состояния водных объектов с использованием картографических и дистанционных методов исследований, разработки структуры комплексного мониторинга единой геосистемы «водосбор – водоток – водоём».

За последние годы Курбатовой созданы оригинальные методики составления тематических карт, отражающих динамику и прогноз состояний речных водосборов, береговых зон морей и водохранилищ, прибрежных акваторий в результате возрастания антропогенной нагрузки и/или возникновения стихийных бедствий.

Член Рабочей группы по вопросам отработки технологий целевого применения гиперспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» при Научном Центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) ОАО «Российские космические системы».

Более 20 лет доцент Курбатова ведёт преподавательскую работу на кафедре картографии и геоинформатики Московского университета геодезии и картографии. Под её научным руководством успешно защищено более 30 дипломных проектов. Курбатова – автор более 80 научных публикаций; несколько карт опубликовано в атласах МЧС (2005 и 2007 гг.) и Национальном Атласе России (2007 г.).

**КУЧМЕНТ Лев Самуилович** – всемирно известный специалист в области изучения и моделирования процессов гидрологического цикла суши, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий лабораторией гидрологического цикла ИВП РАН.

Создатель отечественной школы физико-математического моделирования гидрологических процессов, которая объединяет ведущих специалистов в этой области. Учениками Кучмента в разные годы были д.ф.-м.н. А.Н. Гельфан, д.ф.-м.н. В.Н. Демидов, к.г.н. Ю.Г. Мотовилов, к.г.н. В.Ю. Смахтин – всего 16 кандидатов и докторов наук. Под руководством Кучмента и при его непосредственном участии разработаны первые в мире физико-математические модели процессов формирования снежного покрова и снеготаяния, инфильтрации воды в мёрзлую почву, промерзания почвы, испарения почвенной влаги, внутрипочвенного стока, взаимодействия поверхностных и подземных вод, переноса примеси водными потоками на водосборе и в речном русле. Широкую известность имеет цикл работ автора в области моделирования неустановившегося движения воды и формирования речных русел; им впервые найдены эффективные методы решения обратных задач речной гидравлики.

Фундаментальные научные достижения школы Кучмента используются для решения прикладных задач гидрологии суши. На основе разработанных моделей созданы новые методики оценки изменений речного стока в результате деятельности человека на водосборе и климатических изменений, предложены новые методы оценки риска и масштабов катастрофических наводнений, прогнозирования весеннего половодья и дождевых паводков. Кучмент одним из первых, ещё в начале 1970-х гг., начал разрабатывать автоматизированные систем-

мы гидрологических прогнозов (одна из таких систем была разработана для бассейна р. Волги).

Более 30 лет профессор Кучмент вёл преподавательскую работу на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Сейчас читает курс лекций на кафедре водных ресурсов ИВП РАН.

Основные научные достижения отражены в 160 публикациях, включая 7 монографий, которые являются настольными книгами уже третьего поколения гидрологов – специалистов в области моделирования гидрологических процессов: Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л., Гидрометеоиздат, 1971, 191 с.; Кучмент Л.С. Моделирование процессов формирования речного стока. Гидрометеоиздат, Л., 1980, 143 с.; Кучмент Л.С. Гидрологическое прогнозирование для управления водноресурсными системами. Изд. ВНИТИ, М., 1981, 120 с.; Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. Физико-математические модели. М, Наука, 1983, 216 с.; Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических моделей. М., Наука, 1990, 143 с.; Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М., Наука, 1993, 104 с.; Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М., РАСХН, 2008, 394 с.

**МАСЛИКОВА Оксана Яковлевна** – специалист в области математического моделирования деформаций дна в покрытых льдом нестационарных потоках, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

**МИХАЙЛОВ Вадим Николаевич** – всемирно известный специалист в области гидрологии рек, озёр, дельт и эстуариев, прибрежной зоны морей, доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный профессор Московского университета.

Михайловым разработана теория гидролого-морфологических процессов в устьях рек. Широкую известность приобрели его работы, в которых предложены новые методы расчёта водного баланса речных дельт, распределения стока воды по рукавам дельт, смешения речных и морских вод. На основе результатов организованных Михайловым экспедиционных работ в устьях рек Волги, Терека, Сулака, Кубани, Северной Двины, Печоры, Пура, Таза, Енисея, Лены, Яны, Индигирки, Амура, Амударьи, Дуная, Днепра и Южного Буга, Риони получены новые данные об изменениях гидрологического режима, строения и экологических условий этих объектов.

В течение нескольких десятилетий Михайлов вёл огромную преподавательскую работу на кафедрах гидрологии суши и океанологии географического факультета МГУ, руководил подготовкой 21 кандидатской и 3-х докторских диссертаций. Им опубликовано более 350 научных работ, среди которых 13 научных монографий, четыре научно-методических руководства (в том числе, одно издание ЮНЕСКО на английском языке). Автором изданы три учебника и одно учебное пособие, среди них известные учебники: Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. Учебник. М.: Изд-во МГУ, 1998 и Михайлов В. Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. Учебник. М., Высшая школа, 2008.

Основные достижения Михайлова представлены в монографиях, которые являются настольными книгами нескольких поколений гидрологов: Михайлов В.Н. Динамика потока и русла в неприливных устьях рек. М., Гидрометеоиздат, 1971; Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А Речные дельты. Гидрологоморфологические процессы. Л., Гидрометеоиздат, 1986; Михайлов В.Н. Гидрологические процессы в устьях рек. М., ГЕОС, 1997; Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М., ГЕОС, 1997.

**МИХАЙЛОВА Мария Вадимовна** – ведущий специалист в области изучения гидрологических и морфологических процессов в устьях рек, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

Михайловой разработан балансовый подход при оценке процесса дельтоформирования в условиях естественных и антропогенных изменений речных и морских факторов. На примере устьев рек, впадающих в Каспийское море, ею предложены типовые схемы изменения строения и гидрологического режима дельт в условиях как повышения, так и понижения уровня приёмного водоёма, а также в случаях антропогенного сокращения стока наносов рек. Для оценки процесса затопления приморской части дельты при повышении уровня моря ею разработана концепция подпорной призмы; эта концепция позволяет путём сравнения объёма подпорной призмы с объёмом стока наносов реки рассчитать, будет ли дельта при повышении уровня моря выдвигаться в море или затопляться. На примере многих рек мира Автором изучены особенности проникновения в реки и рукава дельт осолонённых морских вод и проверен ряд соответствующих расчётных методов; ею также выявлены предельные значения дальности проникновения осолонённых вод и «критические» расходы воды реки, при которых начинается такое проникновение.

Член Национального комитета Российской Федерации по Международной гидрологической программе ЮНЕСКО, ответственный секретарь редколлегии журнала «Водные ресурсы», член редколлегий журналов «Environmental Research, Engineering and Management» и «The Journal of Water Security», энциклопедии «Реки и озёра мира», ведёт преподавательскую работу на кафедре Водных ресурсов ИВП РАН.

Автор и соавтор около 150 научных работ, автор более 250 статей в Большой Российской Энциклопедии, Энциклопедии «Реки и озёра мира», научно-популярной энциклопедии «Вода России» (<http://water-rf.ru>). Соавтор крупных коллективных монографий «Гидрология устьев рек Терека и Сулака» (Наука, 1993), «Гидрология дельты Дуная» (ГЕОС, 2004), «Эстуарно-дельтовые системы России и Китая» (ГЕОС, 2007), «The Black Sea Environment» (Springer, 2008), «Устья рек Каспийского региона» (ГЕОС, 2013). Михайлова трижды отмечена премиями МАИК «Наука/Интерпериодика» за лучшие публикации в журнале «Водные ресурсы».

**МОТОВИЛОВ Юрий Георгиевич** – ведущий специалист в области математического моделирования гидрологических процессов в речных бассейнах, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

Автор первых в мире работ по физико-математическому моделированию процессов инфильтрации воды в мёрзлую почву, формирования и таяния снежного покрова в применении к гидрологическим задачам. На основе этих моделей разработаны методики расчётов и прогнозов стока весеннего половодья на равнинных водосборах, предложены методы оценки изменений речного стока в результате деятельности человека на водосборе и климатических изменений.

Мотовилов – создатель наиболее известной в мире отечественной модели формирования речного стока ECOMAG, разработанной на базе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов Л.С. Кучмента. Модель описывает распределённые по пространству процессы формирования и таяния снежного покрова, гидротермические процессы в почве при её промерзании и оттаивании, инфильтрации воды в мёрзлую и незамёрзшую почву, испарения и эвапотранспирации, стекания воды по поверхности водосбора, подповерхностного и грунтового стока, движения воды в речной системе, а также пространственные поля характеристик гидрологического цикла суши для крупных речных бассейнов. ECOMAG – первая в России физико-математическая гидрологическая модель, доведённая до уровня

автоматизированного информационно-программного комплекса, включающего, помимо расчётного блока, специализированные ГИС-приложения, средства автоматизированной обработки пространственно-распределённой информации. С 2002 г. комплекс ECOMAG используется в оперативной практике Росводресурсов для информационного обеспечения задач регулирования стока водохранилищами Волжско-Камского каскада.

Под руководством Мотовилова защищены пять диссертаций, в том числе две – зарубежными учёными в 1990-е гг., когда он работал в ведущих исследовательских организациях Норвегии, Швеции, Японии.

На протяжении многих лет читает лекции на курсах повышения квалификации специалистов Росгидромета и кафедре водных ресурсов ИВП РАН.

Автором опубликовано более 100 работ в ведущих научных журналах, а также 2 монографии: Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока (Физико-математические модели). Наука, М, 1984, с. 216; Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических систем. Наука, М, 1990, 144 с.

**МУЗЫЛЁВ Евгений Львович** – ведущий отечественный специалист в области моделирования гидрологических процессов с использованием данных дистанционного зондирования, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН.

Широкую известность приобрели работы Музылёва по применению данных спутникового зондирования земной поверхности для моделирования стока горных рек, водного и теплового режимов сельскохозяйственных регионов. Впервые в стране им предложены методы ассимиляции спутниковых данных о характеристиках растительного покрова, влажности почвы и осадках для совершенствования методов физико-математического моделирования вертикального тепло- и влагопереноса в системе «почва-растительность-атмосфера».

Автор и соавтор более 100 научных публикаций, в том числе, им опубликована монография «Моделирование стока горных рек и спутниковая информация». М., Наука, 1987. 136 с. Под совместной редакцией Е.Л.Музылёва и Л.С.Кучмента опубликована монография «Моделирование гидрологического цикла речных водосборов». Изд-во ВНИТИ, 1993.

**МЯГКОВА Кристина Геннадьевна** – инженер лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды.

**НАСОНОВА Ольга Николаевна** – известный специалист в области изучения и моделирования процессов тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН. Соавтор совместной с Е.М. Гусевым разработки отечественной модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP. Автор более чем 160 научных публикаций.

В 2008 году за цикл работ, посвящённых исследованию влаго- и теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой и опубликованных в журналах издательства МАИК «НАУКА»/Интерпериодика, Е.М. Гусеву совместно с Насоновой была присуждена Главная премия этого издательства.

Наиболее цитируемый в изданиях базы Web of Science отечественный специалист в области исследования и моделирования тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. Входят в престижный список «Кто есть кто в Российской науке» <http://expertcorps.ru/science/whoiswho>, объединяющий ученых из всех областей науки, имеющих наибольшее число цитирований в базе Web of Science.

**НИКАНОРОВ Анатолий Максимович** – всемирно известный специалист в области гидрохимии, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, заслуженный метеоролог Российской Федерации, заведующий гидрохимическим отделом ИВП РАН (в г. Ростов-на-Дону).

Широкую известность приобрели работы Никанорова, связанные с разработкой методов гидрохимических исследований, созданием научных основ натурного и математического моделирования пресноводных экосистем. Под его руководством разработаны научные основы системы мониторинга качества вод суши и оперативного мониторинга в условиях чрезвычайных ситуаций. Фундаментальные результаты исследований Никанорова отмечены премией Российской академии наук им. П.Ф. Саваренского, двумя международными премиями в области водных ресурсов.

Член Президиума Южного научного центра РАН», выполняет большую научно-организационную работу в составе российских и международных комитетов и комиссий, главный редактор журнала «Гидрохимические материалы», член редколлегий журналов «Водные ресурсы», «Метеорология и гидрология»; член Учёного и Диссертационного советов ИВП РАН, почётный профессор Висконсинского университета США, заведующий кафедрой в Южном Федеральном университете

(ЮФУ). Заслуги А.М. Никанорова отмечены многочисленными правительственные наградами.

Автор и соавтор 553-х публикаций, из них 45 монографий, в том числе, опубликованных за последние годы: Никаноров А.М. Научные основы мониторинга качества вод СПб., Гидрометеоиздат, 2005. 575 с.; Никаноров А.М., Бакаева Е.Н. Гидробионты в оценке качества вод М. Наука, 2006. 239 с.; Никаноров А.М., Стадомская А.Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем Ростов-на-Дону: Изд-во «НОК», 2008, 228 с.; Никаноров А.М., Сухоруков Б.Л., Трофимчук М.М. Методы экспериментальной гидроэкологии. Изд. НОК, 2012, 350 с.; Nikanorov A.M. Monitoring of Water Quality (Scientific and Applied Aspects) New York: Nova Science Publishers, 2013, 446 с.; Никаноров А.М. Брызгало В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Ростов-на-Дону: Изд-во «ЮФУ», 2015, 164 с.

**НОВИКОВА Нина Максимовна** – ведущий отечественный специалист в области ландшафтной экологии и динамики наземных экосистем, изучения закономерностей динамики биокомплексов под влиянием изменений водного режима территорий, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВП РАН

Широкую известность получили результаты Новиковой по оценке экологических последствий природных и антропогенно обусловленных изменений водного режима территорий для наземных экосистем, развитию теории экологически дестабилизированной среды. Под её руководством получены новые результаты в области исследований экотонных систем «вода – суши», их структурно-функциональной организации и динамики.

Председатель Комиссии биогеографии Московского отделения Русского географического общества (РГО), более 20 лет – заместитель главного редактора журнала «Аридные экосистемы, член Учёного совета Московского отделения РГО, Научного совета ОНЗ РАН «Водные ресурсы суши», учёных и диссертационного советов Института водных проблем РАН и географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; эксперт РФФИ и РНФ по вопросам биогеографии и геоэкологии. Руководитель и исполнитель с российской стороны программ ЮНЕСКО «Ecological research and monitoring of the Aral sea deltas; «Aral Sea Project».

Под руководством Новиковой защищены 6 кандидатских и одна докторская диссертации.

Автор и соавтор более 250-ти научных публикаций, в том числе монографий: Новикова Н.М., Полянская А.В. Самурские лиановые леса: проблема сохранения биоразнообразия в условиях развивающегося водного хозяйства. Москва, РАСХН, 1994, 150 с.; Novikova N.M., Kuz'mina J.V. Monitoring of the vegetation in conditions of the Aral Sea ecological crisis. Moscow, RAAS, 2008, 218 p.; Экотонные экосистемы «вода – суша»: методика исследований, структурно-функциональная организация и динамика / Авторский коллектив: Новикова Н.М. и др. / [Отв. ред. Новикова Н.М.]. М., Товарищество научных изданий КМК, 2011, 272 с.; Природные комплексы побережья Цимлянского водохранилища / Авторский коллектив: Новикова Н.М. и др./ [Отв. ред. Новикова Н.М.]. М., Агронаучсервис, 2014, 152 с.

**ПЕРЕКАЛЬСКИЙ Владимир Михайлович** – специалист в области моделирования термогидродинамических процессов в открытых водных потоках, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. Автор известной отечественной модели DYNAMASS, предназначеннной для расчёта гидродинамического и термодинамического режимов открытых потоков, распространения загрязняющих веществ. Особое место занимают работы, в которых моделируются процессы распространения нефтяного загрязнения в различных аварийных ситуациях. Имеет более 40 научных работ.

**РЕШЕТНИК Ольга Сергеевна** – специалист в области гидрохимии и охраны вод, методов и средств контроля качества поверхностных вод, кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле Южного федерального университета.

Область научных интересов – анализ многолетней режимной гидрохимической и гидробиологической информации и оценка изменчивости состояния пресноводных экосистем, исследование региональных особенностей изменчивости состояния пресноводных экосистем и установление границ возможных колебаний системообразующих показателей их состояния.

Автор и соавтор более 100 научных работ из них 2 монографии: Никаноров А.М., Брызгало В.А., Решетник О.С. Реки России в условиях чрезвычайных экологических ситуаций: Ростов-на-Дону, "НОК", 2012, 308 с.; Брызгало В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетник О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Изд-во Южного федерального университета, 2015, 164 с.

**САФРОНОВА Татьяна Ивановна** – ведущий инженер лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды.

**СУХОРУКОВ Борис Львович** – известный специалист в области оценки качества вод с использованием данных об излучательных свойствах водных объектов, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН. На основе результатов многолетних исследований Сухорукова показано, что получаемая из оптических спектров информация в значительной степени является уникальной при изучении свойств экосистем.

**ФЕРРОНСКИЙ Василий Иванович** – ведущий специалист в области палеогидрологических исследований бассейнов Каспийского и Аральского морей в позднем плейстоцене-голоцене с использованием методов изотопного анализа, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВП РАН.

Наиболее значимые результаты исследований:  
на основе анализа изотопного состава кислорода и углерода карбонатов и вещественного состава донных осадков, взятых из глубоководных бассейнов Южного и Среднего Каспия, оценены трансгрессивно-регressiveные циклы, определяющие изменение уровня моря, скорости природных течений и области сноса терригенного материала. Показано, что 10–12 тыс. лет назад Каспийское море оставалось полностью разделённым на два водоёма Апшеронским порогом;  
получены количественные данные короткопериодических изменений режима и амплитуды колебания уровня моря;  
восстановлена картина периодических климатических и гидрологических изменений в Арабо-Каспийском регионе по данным об изотопном, вещественном и гидрохимическом составе осадков и водных масс Каспийского и Аральского морей, залива Кара-Богаз-Гол, озера Иссык-Куль и рек региона;  
подготовлена компьютерная база данных о закономерностях распределения  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$  в донных отложениях озёр, морей и эстуариев рек в зависимости от изменения климата и окружающей среды за последние 10 000 лет.

Ферронским с соавторами опубликовано около 300 научных работ (из них 20 монографий, справочников, учебников) на русском, английском, французском, немецком, испанском, китайском и арабском языках. Результаты его фундаментальных исследований в области изотопного анализа, опубликованные в 5-ти монографиях, широко известны в нашей стране и за

рубежом: Космогенные изотопы гидросферы (Cosmogenic isotopes in the hydrosphere) // В.И Ферронский, В.А. Поляков, В.В. Романов; отв. ред. В.Г. Онуфриев. М., Наука, 1984, 268 с.; Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М., Научный Мир, 2009, 632 с.; Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Isotopes of the Earth's Hydrosphere. Dordrecht-Heidelberg, Springer, 2012, 628 p.; Ferronsky V.I. Nuclear Geophysics. Dordrecht-Heidelberg, Springer, 2015, 522 p.

**ФРОЛОВ Анатолий Васильевич** – ведущий специалист в области стохастической гидрологии, стохастического и динамико-стохастического моделирования многолетних гидрологических процессов, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИВП РАН

Основные научные достижения связаны с разработкой динамико-стохастических моделей многолетних колебаний уровней проточных и бессточных озер (Каспийского моря, озера Байкал, Ладожского озера и др.), стока рек озёрного питания (реки Нева, Ангара, Свирь, Онега и др.) и «неозёрных» рек. Эти модели получены в рамках теории стохастического резервуара. По оценке выдающегося гидролога 20 в. В.Клемеша, «...его [Фролова] работы внесли фундаментальный вклад в стохастическую теорию гидрологических резервуаров со свободным оттоком воды. Таким приближением могут быть описаны природные гидрологические системы, например, речные бассейны, водоносные подземные горизонты, озёра».

Принципиально новым является предложенный Фроловым подход к моделированию многолетних гидрологических процессов как выходных процессов соответствующих систем, обладающих в общем случае положительными и отрицательными обратными связями. В рамках линейного приближения были получены аналитические зависимости, связывающие статистические характеристики выходных и входных процессов. Эти зависимости использовались для оценки реакции многолетних выходных процессов (уровней воды в озёрах, стока озёрных и неозёрных рек и т.п.) на изменения входных процессов (притока в озёра, осадков, испарения на водосборах), вызванных техногенными и/или климатическими воздействиями. Фроловым предложен новый подход к решению обратной задачи – нахождению статистических характеристик входного процесса и параметров гидрологической системы по характеристикам выходного процесса. На основе предложенного подхода Фроловым получены новые результаты по оценке основных статистических характеристик многолетних из-

менений испарения с водосборов крупных рек, а также параметра инерционности водосборов.

Научные результаты автора нашли применение при решении ряда практических задач: расчёта характеристик уровенного режима Каспийского моря при разработке мероприятий по защите побережья моря от подъёма уровня, для проектов освоения запасов углеводородов в прибрежно-шельфовой зоне моря, для выбора безопасной отметки размещения АЭС на морском побережье и других проектов.

Автор более 50 научных работ, в том числе 2 монографий: Фролов А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озёр. М., Наука, 1985, 103 с.; Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М., Геос, 2003, 169 с.

**ХОРУЖАЯ Татьяна Алексеевна** – известный специалист в области исследований токсичности поверхностных вод, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВП РАН. Результаты многолетних исследований автора позволили оценить эколого-токсикологическое состояние водных объектов Южного региона России, выявить степень экологического неблагополучия, выполнить анализ формирования качества воды по химическим, токсикологическим (биотестовым) и гидробиологическим показателям, а также многолетних тенденций их изменений.

**ХРАНОВИЧ Иосиф Лазаревич** – ведущий отечественный специалист в области математического моделирования в задачах управления водными ресурсами, согласования стратегий водопользования, доктор технических наук, главный научный сотрудник ИВП РАН.

Широкую известность приобрели работы Храновича по разработке потоковых моделей управления водными ресурсами, обоснования параметров и режимов водохозяйственных систем (в том числе с учетом качества водных ресурсов). Новые результаты получены автором в области исследования свойств потоковых моделей, предложены методы решения описывающих их задач и процедуры взаимодействия различных моделей. Разработана методология и обоснованы методы выработки стратегий управления водохозяйственными системами в условиях неопределенности; предложены процедуры и разработаны математические модели разрешения конфликтных ситуаций водопользования.

Автор и соавтор более 150 научных работ, в том числе 5 монографий: Великанов А.Л., Хранович И.Л., Клепов В.И. Проблемы надёжности при многоцелевом использовании водных ресурсов. М., Наука, 1994, 225 с.; Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Потоковые модели. М., Научный мир, 2001, 295 с.; Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. М., Научный мир, 2010, 232 с.; Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Потоковые модели. Издание 2-е, исправленное, дополненное. М., Научный мир, 2013, 390 с.; Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Согласование стратегий трансграничного водопользования. М., Энциклопедия, 2016, 216 с.

**ЧИГАНОВА Мария Алексеевна** – специалист в области оценки и мониторинга ксенобиотического (в частности лекарственного) загрязнения водных объектов, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН.

Соавтор первой в стране монографии о лекарственном загрязнении природных вод (Загрязнение природных вод лекарствами / Г.М. Баренбойм, М.А. Чиганова; [отв. ред. Л.И. Эльпинер]. М., Наука, 2015, 283 с.

**ЭЛЬПИНЕР Леонид Исаакович** – ведущий специалист в области медико-экологических исследований вод суши, доктор медицинских наук, профессор, академик Российской экологической академии, член-корреспондент Российской академии естественных наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник ИВП РАН.

Широкую известность получили работы Эльпинера, посвящённые теоретическим разработкам и практическим приложениям медико-экологических оценок и прогнозов для обоснования и поддержки принятия решений, ориентированных на охрану здоровья населения при управлении водными ресурсами в условиях интенсивного техногенеза и изменений климата. Разработанная им методология комплексного гидро-геоэкологического и медико-экологического подхода существенно расширила представления о связях ряда патологических состояний человека с антропогенными загрязнениями подземных вод, особенностями их природного микро- и макроэлементного состава. Эти данные положены в основу новой научной дисциплины – медицинской гидроМЕКОЛОГИИ.

В последние годы исследования Эльпинера ориентированы на разработку научных основ использования медико-экологических подходов при принятии водохозяйственных управлений.

ческих решений, предусматривающих активные приёмы изменения гидрологической и гидрогеологической обстановки в интересах улучшения экологических и социальных условий жизни населения.

Научно-организационная деятельность Эльпинера связана с работой в проблемной комиссии «Гигиена окружающей среды» РАМН, в Научном Совете по проблемам биосферы РАН, участием в крупных государственных экспертизах.

Эльпинер принимал активное участие в организации Международного Конгресса «Вода: экология и технология» – «ЭКВАТЭК», который проводится каждые два года (с 1994г. по настоящее время, согласно постановлениям Правительства РФ); был Генеральным секретарем конгресса и ответственным редактором издаваемых научных трудов.

Международный эксперт ЮНЕП, член Американской Ассоциации качества воды, Международной озоновой Ассоциации, Международной Ассоциации гидрогеологов.

Достижения Эльпинера отмечены Почётными грамотами Президиумов АН СССР и РАН, Минприроды России, серебряной медалью РАЕН «За вклад в развитие медицины и здравоохранения».

Автор и соавтор более 350 научных работ, 3 зарубежных и 10 отечественных монографий, в том числе: «Проблемы питьевого водоснабжения США» (1983), «Опреснение воды в природе и народном хозяйстве» (1987), «Социально-экологические вопросы использования водных ресурсов» (1992), «Руководство по прогнозированию медико-биологических последствий гидротехнического строительства» (1990), «Региональные проблемы здоровья населения России» (1993), «Creeping environmental problems and sustainable development in the Aral sea basin» (UK, 1999), Groundwater and the environment (USA, 2000), «Подземные воды как компонент окружающей среды» (2001).

**ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ  
ИНСТИТУТА ВОДНЫХ  
ПРОБЛЕМ РАН  
1967–2017**

Том 2

Компьютерная вёрстка  
Е.В. Орешкина, А.И. Бурмистрова

Подписано в печать 11.09.2017

Формат 60×90 ½. Уч.-изд. л. 45,4. Усл. печ. л. 45,0

Бумага офсетная. Гарнитура Palatino Linotype. Печать офсетная

Тираж 300 экз.

TK 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](mailto:kursizdat@gmail.com), <http://www.kursizdat.ru>