

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 48, номер 2, 2021

---

---

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Классификация и районирование рек по водному режиму:  
история, методология, перспективы

*Н. Л. Фролова, Е. С. Повалишишникова, М. Б. Киреева* 121

Моделирование быстроразвивающихся паводков на малых  
реках Северного Кавказа с использованием современных  
данных автоматизированной гидрометеорологической сети

*Е. С. Васильева, П. А. Белякова, А. И. Алексюк, Н. В. Селезнева, В. В. Беликов* 135

---

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Плотность частиц донных отложений водных объектов

*Ш. Р. Поздняков, А. В. Реунова* 147

О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов  
на толщину верхнего перемешанного слоя

*Д. С. Гладских, В. М. Степаненко, Е. В. Мортиков* 155

---

## ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Цветение водохранилища многолетнего регулирования стока

*К. К. Эдельштейн, Ю. С. Даценко, В. В. Пуклаков* 164

Свойства природных вод, определяемые их микроструктурной самоорганизацией

*В. И. Данилов-Данильян, О. М. Розенталь* 173

Углеводороды в водах и донных осадках Керченского пролива

*И. А. Немировская, П. О. Завьялов, А. В. Храмова* 183

Факторы и процессы образования соленого озера на берегу Байкала

*А. М. Плюснин, А. В. Украинцев, М. К. Чернявский, Е. Г. Перязева, Н. А. Ангахаева* 194

Сорбционно-десорбционная трансформация стока растворенных микроэлементов  
на геохимическом барьере река–море (по данным лабораторного  
экспериментального моделирования)

*А. В. Савенко, В. С. Савенко, О. С. Покровский* 207

Нитрозамины в водных экосистемах: источники, образование, токсичность,  
экологический риск (обзор) 2. Содержание в гидробионтах,  
биологические эффекты и оценка риска

*И. И. Руднева, С. О. Омельченко* 213

Влияние тайфуна “Гони” на продукционные характеристики прибрежных  
вод залива Посьета Японского моря

*С. П. Захарков, Т. Н. Гордейчук, Ю. В. Шамбарова, Е. А. Штрайхерт* 222

---

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

К нелинейной динамике быстродвижущихся брызг

*Л. Х. Ингель* 233

Правила для авторов

236

---

---



## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.5

### КЛАССИФИКАЦИЯ И РАЙОНИРОВАНИЕ РЕК ПО ВОДНОМУ РЕЖИМУ: ИСТОРИЯ, МЕТОДОЛОГИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ<sup>1</sup>

© 2021 г. Н. Л. Фролова<sup>а</sup>, \*, Е. С. Повалишникова<sup>а</sup>, М. Б. Киреева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет,  
Москва, 119991 Россия

\*e-mail: frolova\_nl@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

После доработки 20.05.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Из всех гидрологических характеристик показателям водного режима рек всегда уделялось особое внимание как интегральным параметрам гидрологического состояния водного объекта из-за возможности использования в различных расчетных и прогнозных методиках. В работе прослеживается развитие в России и за рубежом различных теорий и подходов к районированию территорий по особенностям водного режима рек. Эволюция классификаций, созданных к концу XX в., отражает изменение изученности бассейнов рек, накопление знаний об условиях формирования стока. Показано, что создание специализированных баз данных, содержащих информацию о характеристиках климата и стока рек, тематических электронных ГИС-проектов и карт предопределило развитие современных количественных методов. Учет большого объема привлекаемой гидрометеорологической информации, автоматизация средств обработки и интерпретации информации о характеристиках речного стока, программные комплексы, реализующие базы данных и геоинформационные технологии, веб-приложения дали возможность перейти от общегеографических, описательных классификаций и районирования к количественным, построенным на основе строгих расчетов параметров стока и на разработке новых критериев, характеризующих актуальные для различных отраслей экономики особенности формирования водного режима рек.

*Ключевые слова:* водный режим, районирование, классификации, базы данных, картирование, автоматизация обработки, ГИС-технологии.

DOI: 10.31857/S032105962102005X

#### ВВЕДЕНИЕ

Водный режим представляет собой совокупность закономерно повторяющихся изменений состояния водного объекта, присущих ему и отличающих его от других [14], как результат преобладающих типов питания, влияния географического положения и климата. Настоящая работа посвящена особенностям водного режима рек в различных физико-географических условиях.

Неоднородность климатических и ландшафтных условий крупных территорий послужила толчком для различных подходов к их районированию по признакам сходства и различия в условиях формирования стока рек и их водного режима.

Изучение географических закономерностей изменения водного режима рек и водоемов под влиянием природных факторов и активно развивающейся хозяйственной деятельности человека

необходимо для разработки более совершенных, чем существующие, методов гидрологических расчетов и прогнозов. Актуальность данного исследования связана также с наблюдающимися климатическими изменениями и с вызванной ими трансформацией водного режима. Кроме того, устаревание имеющихся карт водного режима и гидрологического районирования, внедрение новых методов и технологий анализа обуславливают необходимость обновления полученных ранее результатов.

Цель данной статьи – критический анализ основных этапов изучения водного режима рек, эволюции классификаций и схем районирования с учетом накопленных научных знаний, обобщение сведений по трансформации водного режима рек разных регионов Земного шара, по современным классификациям и районированию, направлениям дальнейших исследований.

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 19-15-50621–Экспансия).

## ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИЙ И СХЕМ РАЙОНИРОВАНИЯ В РОССИИ

Первые попытки природного районирования территорий по водному режиму рек относятся к концу XIX–началу XX вв., которое имеет три направления: 1) почвенно-ботаническое; 2) физико-географическое (ландшафтное) и, частично, климатическое; 3) сельскохозяйственное. К основополагающим работам первого и второго направлений в начале XX в. относятся климатические классификации [5, 24, 27, 35, 41], труды В.Н. Сукачева [39], в которых впервые упоминается роль хозяйственной деятельности в формировании водного режима рек. Значительный вклад в развитие ландшафтного районирования внесли Л.С. Берг [4], М.А. Первухин [33] и А.А. Григорьев [15], положивший начало климатическим моделям районирования как первопричине формирования стока, впоследствии получившим широкое развитие в работах М.И. Будыко [16].

Собственно гидрологическое районирование впервые предпринято А.И. Воейковым. В 1884 г. он предложил классификацию рек мира, основанную на утверждении “река – продукт климата”. А.И. Воейков выделил три типа рек по преобладающему питанию и девять подтипов, учитывающих орографию и водный режим [10]. В 1925 г. В.П. Семенов-Тянь-Шанский предложил наряду с физико-географическими и климатическими аспектами учитывать водность рек [36, 37]. Классификации были сугубо качественные и описательные. Дальнейшее деление на группы проводилось с учетом различий водности отдельных фаз гидрологического режима рек.

К середине XX в. появились еще четыре классификации водного режима: Л.К. Давыдова (1933 г.) [17], М.И. Львовича (1938 г.) [30], Б.Д. Зайкова (1946 г.) [21] и В.А. Троицкого (1948 г.) [40]. Классификация В.А. Троицкого была сугубо климатической. В основу классификации Б.Д. Зайкова легло внутригодовое распределение стока, условия питания рек он не рассматривал. Тем не менее выделение десяти типов водного режима позволило ему дать очень полную характеристику гидрологического режима рек СССР. В 1952 г. появилась классификация Д.Л. Соколовского по внутригодовому распределению стока рек, представляющая собой упрощенный вариант классификации Зайкова. В 1955 г. Л.К. Давыдовым было выполнено районирование территории СССР по бассейнам морей и крупным речным водосборам. В результате им были выделены 15 гидрографических районов. В классификации не учитывалось многообразие режима средних и малых рек.

Основное уязвимое место любой качественной классификации, очевидно, заключается в субъективном выборе границ различных групп объектов. В классификации М.И. Львовича впервые предложены количественные критерии выделения типов питания рек (<50, 50–80, >80%). Им получена матрица из 144 вариантов, 38 из которых наблюдались на реках мира, а 20 – на территории СССР [29].

С первой половины XX в. стали применяться гидрологические характеристики, дающие косвенные представления о величине стока. На их основе строились карты сезонного стока, выделялись районы со сходными условиями формирования водного режима [13, 25]. По классификации В.И. Астраханцева территория делится по “зонам водности” на основе значения модуля стока [2]. В середине XX в. советскими гидрологами активно изучалась проблема минимального стока рек [6, 7].

В 1960 г. П.С. Кузин совместил в своей классификации все основные аспекты формирования стока: разделил реки на большие, средние и малые, рассмотрел аспекты географического ландшафта, типы питания рек, основные гидрологические сезоны и фазы водного режима. В результате им выделено 3 типа и 14 подтипов водного режима рек для равнинных и горных территорий различных климатических зон [26].

Морфогенетический подход к описанию водных режимов – устойчивая традиция в отечественной гидрологии – взят за основу при составлении Карты водного режима рек России, разработанной сотрудниками кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова В.М. Евстигнеевым и Н.В. Шенберг [9]. В классификации показаны особенности водного режима крупных речных систем в зависимости от направления течения, типа и вида охватываемых ими природных зон и географических регионов.

В 2011 г. классификация М.И. Львовича была дополнена 20 новыми типами водного режима рек мира для регионов, по которым у него не имелось фактических данных [28]. Кроме того, автором проведена оценка устойчивости типизации сезонной структуры стока рек в разных природных условиях.

В Национальном Атласе России [32] представлены карты типов водных режимов, годового стока и стока рек по типам питания, совместный анализ которых позволяет дать достаточно полную характеристику водного режима рек России, основанную на предшествующих исследованиях в этой области.

## ЗАРУБЕЖНЫЕ КЛАССИФИКАЦИИ РЕК ПО ВОДНОМУ РЕЖИМУ

Классификации водного режима рек мира активно развивались с середины XX в., что в некоторой степени основывалось на анализе российских и советских классификаций. Одной из первых, сочетавших физико-географический и гидрологический аспекты формирования стока, можно считать классификацию Парде, который в 1955 г. выделил три типа режима рек: простой, смешанный и сложный [84]. Каждый из них делился на подтипы (гляциальный, нивальный, плювиальный) и их переходные формы, исходя из высотного положения бассейнов, качественного описания внутригодового распределения стока и введенных диапазонов изменения амплитуды, модуля и коэффициента стока.

Еще одной крупной зарубежной гидрологической классификацией можно считать карту внутригодового стока рек Института географии Бернского университета [48]. Три выделенных типа гидрологического режима делились на 16 подтипов по средней высоте бассейна, площади его оледенения и статистическим характеристикам. По результатам исследований создан гидрологический атлас [66].

В 1906 г. в Канаде был издан атлас природных ресурсов страны, который к концу XX в. трансформировался в Интернет-источник по всем природным ресурсам Канады, включая водные [85]. Здесь можно найти районирование Канады по основным климатическим и гидрологическим характеристикам, карты среднего многолетнего, сезонного и внутригодового распределения стока рек.

Со второй половины XX в. с развитием национальных сетей гидрологических постов развиваются классификации, основанные на измеренных и рассчитанных количественных параметрах стока. Это несколько десятков характеристик, встречающихся в разных сочетаниях в современных классификациях в исходном виде и после статистической обработки (например, методами кластеризации, с помощью различных регрессионных моделей, алгоритмов машинного обучения и др.).

Так, в 1989 г. в США была опубликована статья об изменчивости стока и региональном анализе типов водотоков [93]. В ней проанализированы многолетние наблюдения по 78 водотокам в континентальной части страны. Для каждой реки получены 11 наборов статистических данных и выявлены 9 типов водного режима: прерывистый пересыхающий; прерывистый изменчивый; прерывистый; постоянный изменчивый; постоянный; реки со снеговым, смешанным снежно-дождевым, дождевым зимним, преимущественно подземным питанием.

В 1988 г. в Мельбурне появилась глобальная классификация режимов рек [60], выполненная по сезонному распределению водности 969 водных объектов на основе кластерного анализа среднемесячного стока, выраженного в процентах. Авторами составлена карта типов водного режима рек. По той же базе данных предложена глобальная классификация рек, в рамках которой на карте мира выделено 15 гидрологических районов [65]. Ее основной недостаток – ограниченность данных, которая компенсировалась подбором климатических характеристик выделенных районов.

В последние 20 лет развернулись широкомащтабные исследования режима рек на всех материках Земного шара. Научные публикации, представляющие различного рода типизации и классификации гидрологического режима рек, опубликованы по различным районам Европы [53, 62, 72, 78, 82], США [74, 81, 95, 96], Канады [46], Австралии [69, 75], Эфиопии [51] и др.

В статье [69] представлена первая классификация типов водного режима, разработанная для всего австралийского континента. Она составлена на основе 120 критериев, описывающих экологически важные характеристики естественного гидрологического режима на 830 постах, и включает 12 типов водного режима, различающихся сезонным распределением стока, колебаниями величины и частоты наводнений, стабильным и нестабильным базисным, летним и зимним стоком и др.

Классификация рек Средиземноморья по климатически обусловленным типам проведена в [91] на основе анализа многолетних данных 60 постов по всему Средиземноморскому бассейну.

В начале 2000-х гг. по 35 речным бассейнам Великобритании предложена классификация рек по внутригодовой изменчивости стока и новый индекс чувствительности для оценки отклика речного стока на климатические изменения [54, 103]. Этот индекс определяет тесноту и вид связи между климатическими классификациями и типами водного режима рек, что особенно актуально для районов с недостаточной гидрологической изученностью.

Вслед за региональными классификациями стали появляться классификации для крупных регионов и материков, а также теоретические исследования, нацеленные на разработку глобальных классификаций режима рек мира. В [58] для определения географических различий сезонной изменчивости стока рек использованы ряды среднемесячных расходов по 1345 постам по всему миру. Авторами отмечена наибольшая межгодовая изменчивость стока, превышающая колебания осадков, в засушливых регионах (Юго-Запад США, Мексика, Сахель). Наиболее устойчивый

сток отмечен на реках тропической зоны. Прослежены связи временных колебаний стока рек некоторых частей Америки, Европы и Австралии с явлением Эль-Ниньо; влияние климата Северной части Тихого океана на режим рек западного побережья Северной Америки и тропического пояса, климатических колебаний над Атлантикой на режим рек восточного побережья США, тропических районов Южной Америки и Европы.

В статье [80] обобщены характеристики стока по данным наблюдений на 1221 реке с естественным режимом по всему миру. Рассмотрены средние значения, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, тип распределения и обеспеченность стока. Исследованы продолжительность, величина и выраженность минимальных расходов.

В статье [88] приведен анализ методологий гидрологических классификаций и их применения в гидроэкологии. В [98] проведено сравнение шести дедуктивных и индуктивных классификаций режимов рек Новой Зеландии, выполненных на общей базе исходных данных. В качестве предикторов использовано около 30 характеристик стока, полученных на реках по всей стране. В одних классификациях данные подвергались кластерному анализу, в других — обрабатывались классификатором машинного обучения “Random Forest”, применяемым для задач классификации, регрессии и кластеризации. Авторами сделан вывод о плохой сходимости результатов между собой и о наиболее корректной работе классификаций, основанных на индуктивном подходе.

Одна из последних — глобальная классификация рек мира GloRiC, предложенная канадскими исследователями [56, 64]. Главная цель GloRiC — разработка схемы основных критериев, используемых в классификации, и определение общего набора характеристик режима рек, которые могут быть использованы для составления глобальных и региональных шкал классификаций разной детальности. Структура GloRiC определена на основе систематизации 60 классификаций разного пространственного масштаба, объединивших 633 абиотических и биотических переменных классификатора. Выбор переменных, на основе которых разрабатывались три базовые подклассификации GloRiC, а также определение количества классов и их граничных значений проводилось на основе статистической обработки данных и экспертного мнения исследователей. Концептуальную основу GloRiC составили пять категорий переменных: гидрологическая, физико-климатическая, русловых процессов, гидрохимическая и гидробиологическая, — позволившие дать комплексную характеристику состояния реки. В итоге все наиболее крупные и значимые речные системы мира объединены в 127 групп.

Таким образом, эволюция классификаций рек по водному режиму, созданных к концу XX в. и в начале XXI в., отражает степень гидрометрической и гидролого-климатической изученности бассейнов рек, накопление научных знаний об условиях формирования стока. Значительное увеличение потребления водных ресурсов во всех сферах мировой экономики и зависимость экономического развития от количества доступных и возобновляемых водных ресурсов определили потребность в переходе описательных классификаций и районирования к построенным на основе расчетов параметров стока.

### СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В КЛАССИФИКАЦИЯХ И РАЙОНИРОВАНИИ

Современные изменения климата и окружающей среды проявляются на всех континентах в разнонаправленных тенденциях, что так или иначе приводит к трансформации гидрологического режима рек, отмеченной учеными во всем мире. Данная статья касается результатов исследований только для европейского континента, включая территорию России.

Одна из последних для территории Европы — обобщающая работа [53], в которой участвовали авторы статьи. Впервые на континентальном уровне выявлены региональные различия изменений характеристик максимального стока. Результаты показывают следующее: (1) увеличение количества осадков осенью и зимой привело к росту максимальных расходов воды в северо-западной Европе; (2) сокращение осадков и увеличение испарения в Южной Европе привели к уменьшению расходов средних и крупных водосборов; (3) уменьшение запасов воды в снежном покрове вследствие зимних оттепелей привело к уменьшению максимальных расходов воды в Восточной Европе. Региональные тенденции изменения характеристик максимальных расходов воды в Европе за десятилетие находятся в диапазоне от +11.4 до –23.1%.

Некоторые аспекты изменения характеристик водного режима рек Европы рассмотрены в работах [52, 78, 92, 94]. На реках с преобладающим весенним стоком, сходных по режиму с реками на севере и в средней полосе ЕЧР, отмечено увеличение стока в осенне-зимний период, связанное с дождями и оттепелями, и сокращение стока весеннего половодья, что также подтверждается исследованиями [99, 101]. В высокогорных бассейнах Европы отмечено уменьшение летнего стока, вызванное сокращением площадей ледников, оттаиванием вечной мерзлоты и, как следствие, увеличением фильтрационной способности грунтов [79, 97]. Произошло смещение дат весеннего

половодья, для >25% рассмотренных рек его пик сдвинулся с июня на май, возросла его продолжительность. На реках с преобладающим дождевым питанием (Атлантическое побережье) отмечено увеличение годового стока, что вполне согласуется с возросшей величиной осадков в последние десятилетия. В бассейне Эльбы и Одера повторяемость высоких зимних паводков сократилась, что, по мнению авторов, связано с более мягкими зимами, а летних — осталась без изменений [83]. Масштабные исследования гидрологического режима более 90 рек Польши позволили выделить 8 групп рек, различающихся по степени трансформации их многолетнего стока [104], и выявить многолетние периоды его изменений: 1950–1960-е, 1970–1980-е, 1990–2010-е гг., причем для разных групп рек колебания стока в эти периоды имели противоположно направленные тенденции. По степени трансформации сезонного стока выделено 5 групп рек.

Минимальный сток на реках Центральной Европы, по данным наблюдений, с конца XIX в. до 1980-х гг. несколько увеличился [87]. Климатически обусловленный рост меженного стока связан с увеличением количества и интенсивности кратковременных летних осадков. К не климатическому фактору относится изменение управления водными ресурсами (регулирование и переброски стока из других бассейнов, использование подземных вод и их последующий сброс в речную сеть). Если говорить о климатически обусловленных изменениях летнего меженного стока в бассейне Дуная в последние десятилетия, то вследствие сокращения летних осадков и повышения температуры воздуха наметилась тенденция его уменьшения, которая будет сохраняться в будущем согласно прогнозам, составленным по существующим климатическим моделям. Наибольшим внутригодовым трансформациям подвергнется режим рек южных, более сухих районов Европы [87], где обострится проблема летнего водообеспечения населения. Эти выводы хорошо согласуются с результатами исследований стока рек ЕЧР авторами статьи [38].

Результаты изучения водного режима рек Белоруссии подтверждают тенденцию роста расходов зимних паводков на реках Центральной России и ее северо-западной части. Выявлено статистически значимое увеличение максимальных зимних расходов воды на десяти из 30-ти исследованных реках, что связано с возрастанием роли западного типа циркуляции атмосферы [11]. Рост максимальных расходов воды на большинстве рек Белоруссии составляет ~10%, лишь на реках Полесья максимальные расходы зимних паводков возрастают на 20–40%.

В качестве обобщающего параметра, характеризующего изменение гидрологического режима

рек ЕЧР, предложен коэффициент трансформации стока на основе четырех наиболее репрезентативных параметров: годового, максимального, базисного и сезонного стока. Методика его расчета изложена в [43]. Наиболее измененным с 1945–1977 гг. оказался водный режим рек бассейнов Оки, Дона, Верхнего Урала, левобережья среднего течения Волги.

Суммируя результаты проведенного анализа, можно сделать следующие выводы:

Доля весеннего стока как основного гидрологического сезона сохранилась в бассейнах северных рек и резко сократилась в бассейнах рек лесостепной и степной зон, а также рек, берущих начало на Среднерусской возвышенности. Это верховья Дона (с 54 до 45 мм), Оки (с 95 до 83 мм), Северского Донца, притоки Средней и Нижней Волги (до 50% стока). Некоторое сокращение весеннего стока отмечено в верховьях бассейна Камы. Напротив, севернее 58°–60° с.ш. наблюдается общая тенденция его роста (до 20–50% по отдельным бассейнам) [70]. Наибольший рост максимальных расходов воды приурочен к бассейну Свири, верховьям Сухоны, левобережным притокам Верхней Волги и верховьям Урала [1].

Наибольшим изменениям подвергся меженный сток. Значимые тренды увеличения летнего меженного стока после 1980 г. отмечены во всей лесостепной и степной зоне ЕЧР. В верховьях бассейна он возрос в среднем с 16 до 28 мм [3, 38]. Повсеместно, на 95% проанализированных постов, отмечен рост зимнего меженного стока. Для 82% постов рек бассейнов Дона и Волги это изменение оказалось значимым [44, 70]. Доли летнего и зимнего меженного стока увеличиваются в бассейнах всех рек лесной и лесостепной зоны в пределах 50°–60° с.ш.

Среднегодовой и базисный сток имеют тенденции к повсеместному увеличению с разной степенью выраженности этого процесса [38].

Наименьшая трансформация водного режима произошла в бассейнах северных рек (Онеги, Северной Двины, Мезени и Печоры), а также в левобережных притоках Верхней Волги, в бассейне Вятки и Верхней Камы. Она незначительно выражена в левобережных притоках Средней Камы и на Нижней Волге. Наибольшей трансформации подвергся сток бассейнов Оки, Дона и Средней Волги (рис. 1).

В целом, обобщая отмеченные выше особенности современной трансформации гидрологического режима рек, можно сказать, что разнонаправленные тенденции изменения температуры воздуха и количества выпадающих осадков в различных климатических регионах Европы привели к столько же разнонаправленному, но повсеместному изменению гидрологического режима рек континента.

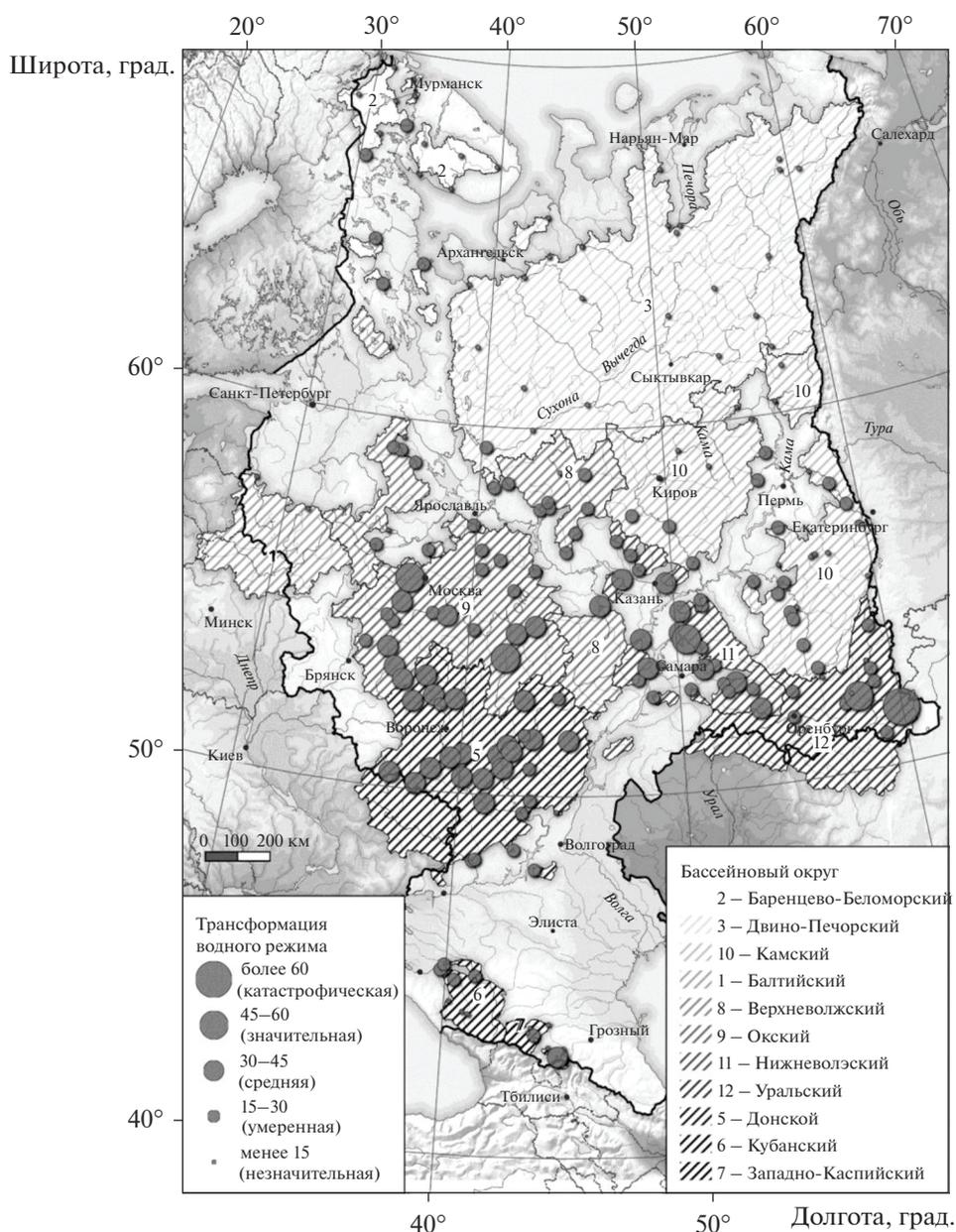


Рис. 1. Карта коэффициента трансформации водного режима рек ЕЧР в 1978–2016 гг. по сравнению с 1945–1977 гг.

### ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК

Большинство публикаций в последнее десятилетие основаны на трех ключевых аспектах создания классификации водного режима на современном уровне развития научного знания: а) автоматизированные средства обработки исходных гидрологических данных; б) обоснованный региональными особенностями или спецификой задачи перечень используемых параметров; в)

унифицированная база данных по отобранным характеристикам.

Обработка исходных гидрологических данных проводится в готовых программных продуктах или написанием скрипта на одном из легко интерпретируемых языков программирования (R-Studio, Python, MatLab).

Среди готовых продуктов в международной практике наиболее популярна программа IHA (Indicators of Hydrologic Alteration) [76, 89, 100]. При отсутствии генетического анализа рядов стока, ручном определении границ гидрологических сезонов и их пороговых значений программа поз-

воляет рассчитывать 66 характеристик водного режима.

Для выделения базисной составляющей стока можно использовать пакет HydroOffice [67], который подходит для рек с паводочным режимом. В пакетах WHAT (Web-based Hydrograph Analysis Tool) и HYSEP (Hydrograph Separation Program) [73, 102] выделение генетических составляющих стока ведется при помощи различных фильтров.

В российской практике применяют программный комплекс “Гидрорасчеты”, разработанный в НПО “Гидротехнологии” [12]. Альтернативой ему является программа HydroStatCalc (ГГИ) [23]. Кроме того, на кафедре гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова разрабатывается пакет GrWat [70], позволяющий проводить автоматизированное расчленение гидрографа по типам питания на основе его комплексного графоаналитического и генетического анализа и рассчитывать 53 характеристики водного режима, включая показатели паводочного стока.

В последнее время для анализа гидрологических рядов пользуются скриптами на языках R-Studio или Python, множество из которых имеет открытую лицензию и размещены на ресурсе ГитХаб [63]. Создание баз данных обычно реализуется средствами языков программирования Java или в форме запросов, отсылаемых к глобальным таблицам в формате .txt или .xlsx. Чаще всего базы данных являются основой для веб-приложений, которые позволяют визуализировать, обрабатывать и выгружать в нужном формате пространственно-временную информацию.

Ее первый уровень – представление о рельефе, физико-географических условиях, гидрографии, гидрометеорологической изученности водосборов. К таким ресурсам можно отнести сервисы HydroSHEDS [68] с информацией о границах водосборных бассейнов рек мира, полученных на основе анализа ЦМР SRTM с разрешением 3” с последующей генерализацией до разрешения 15” и 30”. При создании HydroSHEDS использовались данные о водных объектах SRTM (SRTM Water Body Data, SWBD); речная сеть с цифровой карты мира (Digital Chart of the World, также известная как VMAP0); база данных по озерам и водно-болотным угодьям (Global Lakes and Wetlands Database, GLWD) и несколько других глобальных и региональных цифровых карт речной сети.

Среди региональных баз данных можно отметить Ecrins (European catchments and rivers network system) [59]. Это набор векторных пространственных данных по Европе (в том числе ЕЧР) и Ближнему Востоку, включающий в себя реки, озера, элементарные и агрегированные водосборные бассейны, плотины, препятствия, гидропосты.

Среди отечественных разработок можно отметить геопортал “Речные бассейны Европейской России”, разработанный в Институте экологии и природопользования Казанского федерального университета [34]. Геопортал представляет собой разнообразные гидрометеорологические данные, сгруппированные по малым водосборам ЕЧР. Базовый слой “Бассейны” содержит 53865 бассейнов малых рек и межприточных пространств. Малые водосборы рассчитаны аналитически по ЦМР GMTED2010 [57] с пространственным разрешением 250 м и по цифровой карте гидрографической сети масштаба 1 : 1000000 с привлечением контуров объектов гидрографии с топографических карт [18, 19].

CatchX – веб-приложение, позволяющее в пределах выбранного водосборного бассейна визуализировать временные изменения за 25 лет по осадкам, температуре, суммарному испарению, стоку и типам почвенно-растительного покрова. Границы водосборов взяты по всему миру по HydroBASINS – всего 57646 бассейнов [55].

Гидрологически направленный ресурс FluentHydro разработан в рамках проекта РГО и РФФИ 2017–2019 гг. “Геоинформационное картографирование речного стока и его изменений в условиях нестационарного климата (на примере Северо-Запада России)” [61]. Портал работает в тестовом режиме и содержит информацию, отражающую гидрологическую изученность и визуализацию сеточных поверхностей, рассчитанных на основе сценариев изменений климата. Также предусмотрена возможность скачивать информацию за период с 2008 по 2017 г.

Новый веб-сервис – портал “Водный режим рек ЕЧР” [8], разработанный на кафедрах гидрологии суши и картографии и геоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова в рамках проекта РФФИ-РГО “Комплексное исследование и картографирование современного водного режима рек европейской территории России и его опасных проявлений”. На портале реализована привязка данных не только к гидрологическим постам, но и к их бассейнам, предусмотрена возможность выгрузки данных, динамического расчета параметров стока и статистической обработки полученных величин с помощью стандартных критериев, визуализации отдельных параметров в виде графиков.

Сейчас подобные порталы – основа мониторинга и прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений. В настоящее время сервис Google развивает портал по глобальному прогнозу наводнений на основе алгоритмов машинного обучения [77, 86]. Ресурс может быть запущен в глобальном масштабе в ближайшие 2–3 года. С использованием алгоритмов машинного обучения начала работу система краткосрочного

**Таблица 1.** Доступные и наиболее часто используемые гидрологические базы данных

Ресурс	Период, годы	Пространственный охват	Интернет-адрес базы данных
АИС ГМВО	2007–2017	Территория РФ (2500 постов)	<a href="https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505">https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505</a>
GRDC	1965–2020 (1985)	Общемировой (9900 постов)	<a href="https://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html">https://www.bafg.de/GRDC/EN/Home/homepage_node.html</a>
R-ArcticNet	1960 (1936)–1990	Региональный (3713 постов рек Арктической зоны)	<a href="http://www.r-arctic-net.sr.unh.edu/v4.0/index.html">http://www.r-arctic-net.sr.unh.edu/v4.0/index.html</a>
Environmenti.fi	2001–2019	Финляндия	<a href="http://wwwi3.ymparisto.fi/i3/paasivu/ENG/Virtaama/Virtaama.htm">http://wwwi3.ymparisto.fi/i3/paasivu/ENG/Virtaama/Virtaama.htm</a>
Banque HYDRO	1960–2019	Франция (5000 постов, 3200 – действующих)	<a href="http://hydro.eaufrance.fr/">http://hydro.eaufrance.fr/</a>
eHYD	2014–2016 (ежегодники 2004–2019 гг.)	Австрия	<a href="https://wasser.umweltbundesamt.at/hydjb/">https://wasser.umweltbundesamt.at/hydjb/</a> Ежегодники: <a href="https://www.bmlrt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/hydrographische_daten/jahrbuecher.html">https://www.bmlrt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/hydrographische_daten/jahrbuecher.html</a>
Ymparisto	Текущие	Финляндия	<a href="http://wwwi2.ymparisto.fi/i2/90/wyax2/vesitilanne.html">http://wwwi2.ymparisto.fi/i2/90/wyax2/vesitilanne.html</a>
VIGICRUE	>>	Франция	<a href="https://www.vigicruces.gouv.fr/">https://www.vigicruces.gouv.fr/</a>
eHYD	>>	Австрия	<a href="https://ehyd.gv.at/">https://ehyd.gv.at/</a>
USGS	>>	США	<a href="https://maps.waterdata.usgs.gov/mapper/index.html">https://maps.waterdata.usgs.gov/mapper/index.html</a>
DORIS	>>	Бассейн Дуная	<a href="http://www.doris.bmk.gv.at/en/fairway-information/water-levels/achleiten">http://www.doris.bmk.gv.at/en/fairway-information/water-levels/achleiten</a>
Центр Регистра и Кадастра	>>	Реки РФ (только по регистрации)	<a href="http://gis.vodinfo.ru/waterstocks/#">http://gis.vodinfo.ru/waterstocks/#</a>
AllRivers	>>	Реки РФ	<a href="https://allrivers.info/">https://allrivers.info/</a>

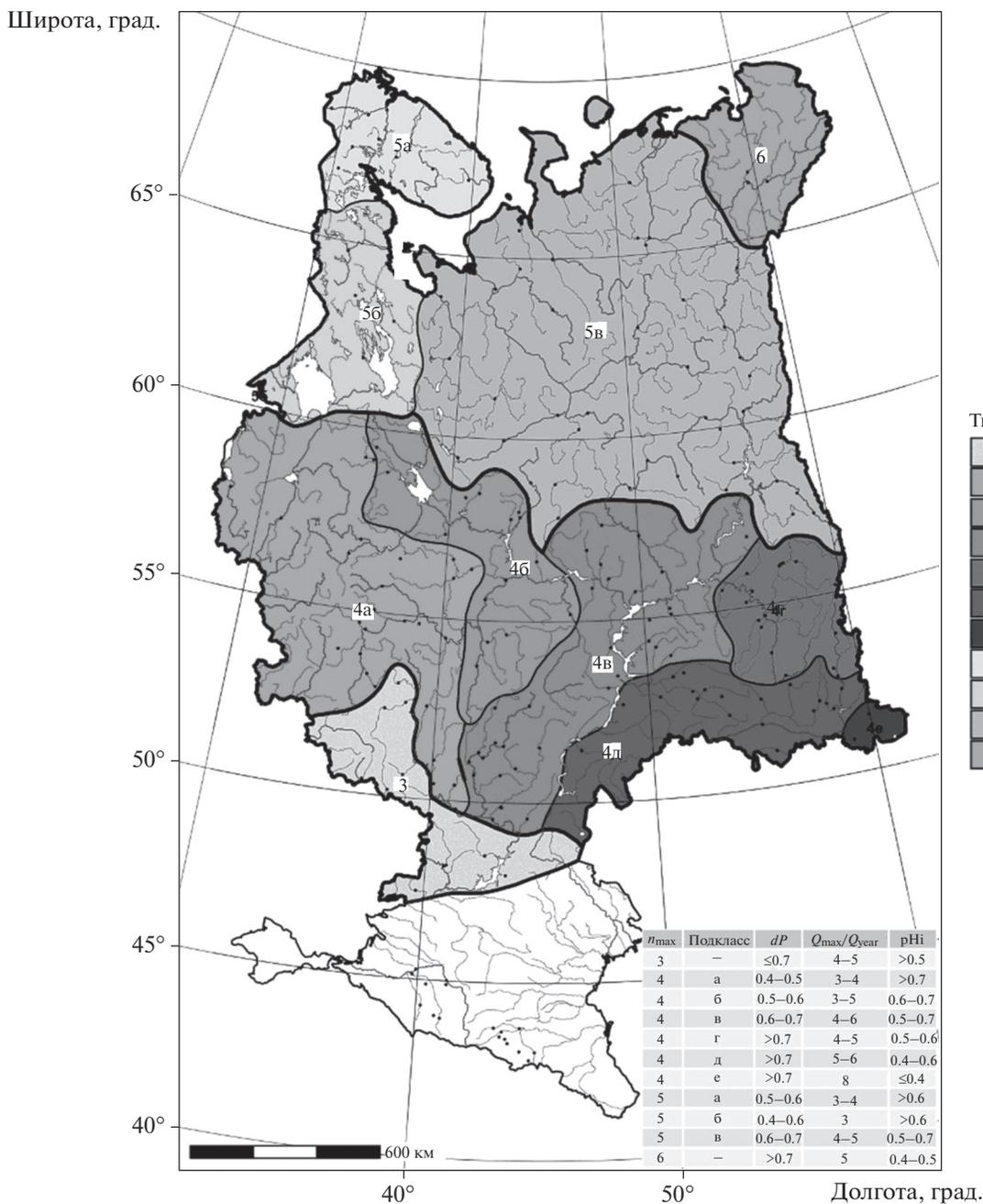
прогнозирования стока для некоторых рек России – OpenForecast [90]. В ее основе – данные гидрологического мониторинга и применение физико-математических моделей глобальной циркуляции атмосферы и океана, а также формирования речного стока.

Среди удачно реализованных национальных систем мониторинга режима водных объектов можно выделить eHyd (Австрия) и VIGICRUE (Франция). В большинстве развитых стран Европы архивные и оперативные характеристики стока объединены в рамках одного сервиса и доступны любому пользователю. Обычно такие сервисы имеют встроенный картографический блок, который позволяет искать нужную станцию на карте – подобная схема реализована для архивов в Финляндии, Австрии и США. Для крупных рек создано большое количество региональных баз

данных и сервисов, как, например, проект по мониторингу водных ресурсов в бассейне Дуная (DORIS).

В России оперативная информация по уровням воды официально не является общедоступной и не публикуется Росгидрометом открыто. Отдельные территориальные управления частично размещают оперативную информацию на своих сайтах. Так, например, по Северо-Западному УГМС доступна оперативная информация об уровне воды в Неве и Финском заливе [22]. Существующая Единая система мониторинга Мирового океана (ЕСИМО) [20] доступна только для сотрудников Росгидромета.

На сайте Центра Регистра и Кадастра [45] для зарегистрированных ранее пользователей доступна оперативная информация по уровням воды на



**Рис. 2.** Типы водного режима рек ЕЧР. Номер типа водного режима соответствует номеру месяца  $n_{\max}$  с максимальным месячным расходом воды. Подкласс отражает сочетание референсных значений доли половодья  $dP$ , соотношения максимального среднемесячного и годового расхода воды  $Q_{\max}/Q_{\text{year}}$  и коэффициента естественной зарегулированности стока  $\rho_{\text{Н}}$ .

части гидрологических постов в пределах РФ. Единственная открытая система оперативных уровней воды на реках России – портал AllRivers [47]. Информация на нем – ознакомительная и не официальная, основная цель портала – поддержка водного туризма в регионах РФ.

Возможные источники гидрологической информации собраны и обобщены в табл. 1.

Создавая базы данных как основу классификаций водного режима рек, современные исследователи применяют традиционные методы кластерного анализа, такие как PCA, k-means, RG\_Boost, интенсивно развивающиеся нейронные сети и алгоритмы Random Forest.

Более ранняя попытка кластеризовать типы водного режима на основе среднемесячных зна-

чений стока проделана в [65]. Авторы выделили до 15 групп рек с разным водным режимом и построили карту типов водного режима. В [49] для классификации гидрографов разных лет применены методы функционального анализа.

Один из наиболее перспективных методов – использование нейронной сети особой архитектуры с долгой краткосрочной памятью (Long short-term memory; LSTM), которая представляет собой последовательность слоев, каждый элемент которого принимает на вход сигналы от всех элементов предыдущего слоя [71].

В рамках проекта РФФИ–РГО авторами данной статьи предложена современная классификация типов водного режима рек ЕЧР на основе базы данных за 1978–2015 гг. и результатов ее обработки методом пространственно-ограниченной кластеризации. Районирование проведено по четырём показателям, привязанным к гидропостам: месяцу прохождения максимального месячного стока, доле весеннего стока, отношению максимального расхода к среднему годовому, коэффициенту естественной зарегулированности. Географически наиболее выразительный результат получился при использовании сочетания месяца прохождения максимального месячного стока и доли весеннего стока. Результирующая карта типов водного режима представлена на рис. 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование особенностей водного режима рек и его трансформации при изменении климата и антропогенном воздействии, разработка классификаций и схем районирования имеют исключительную научную и практическую значимость. Рост интереса к этому направлению связано с изменением степени изученности бассейнов рек, устареванием имеющихся картографических обобщений, внедрением новых методов и технологий анализа и обработки данных.

Эволюция созданных к концу XX в. классификаций отражает изменение гидрометрической и гидролого-климатической изученности бассейнов рек, накопление научных знаний об условиях формирования стока. Значительный рост использования водных ресурсов во всех сферах мировой экономики определил потребность в переходе от общегеографических, описательных классификаций и районирований к количественным.

Современные подходы к исследованию водного режима рек основаны на создании специализированных комплексных баз данных по климату и стоку рек, тематических электронных ГИС-проектов и карт. Большой объем привлекаемой гидрометеорологической информации предполагает переход к количественным классификациям на основе строгих расчетов параметров стока и

разработки новых критериев, характеризующих актуальные для различных отраслей экономики особенности формирования водного режима рек. Автоматизация средств обработки и интерпретации информации, разработка программных комплексов требуют новых методических рекомендаций по их использованию. Результаты современных исследований позволяют получить новые данные об изменении характеристик водного режима рек, в том числе на территории России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И.* Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
2. *Астраханцев В.И.* О принципах гидрологического районирования Сибири и Дальнего Востока // Изв. СО АН СССР. № 2. 1958.
3. Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России / Под ред. *Р.Г. Джамалова, Н.Л. Фроловой.* М.: Ровикс, 2014. 96 с.
4. *Берг Л.С.* Географические зоны СССР. М.: Географгиз, 1947. 356 с.
5. *Броунов П.И.* К вопросу о географических районах Европейской России // Современные вопросы русского сельского хозяйства (к 50-летию юбилею И.А. Стебута). СПб., 1904. С. 23–45.
6. *Владимиров А.М.* Минимальный сток рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 214 с.
7. *Владимиров А.М.* Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.
8. Водный режим рек ЕТР [Электронный ресурс]. URL: <http://carto.geogr.msu.ru/hydrograph> (дата обращения 28.04.2020)
9. *Евстигнеев В.М., Шенберг Н.В., Анисимова Н.В., Зайцев А.А.* Водный режим рек России и сопредельных территорий. Карта для высших учебных заведений масштаба 1 : 8000000. Новосибирск: Новосибирская картографическая фабрика Роскартографии, 2001.
10. *Воейков А.И.* Избранные сочинения. Т. 1. М.; Л., 1948. 751 с.
11. *Волчек А.А., Шелест Т.А.* Формирование зимних паводков на реках Беларуси // Уч. зап. РГГМУ. Вып. 25. 2012. С. 5–19.
12. Гидрорасчеты: ГИС. СПб.: НПО “Гидротехнологии”, 2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://hydrotec.spb.ru> (дата обращения 28.04.2020).
13. *Глушков В.Г.* Географо-гидрологический метод // Изв. ГГИ. № 57–58. 1933. С. 5–9.
14. ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1988.
15. *Григорьев А.А.* Опыт характеристики типов физико-географической среды // Проблемы физической географии. 1938. Вып. 5. С. 3–45.

16. Григорьев А.А., Будыко М.И. Классификация климатов СССР // Изв. АН СССР. Сер. географическая. № 3. 1959. С. 13–19.
17. Давыдов Л.К. Классификация рек Средней Азии по типу их питания // Зап. ГГИ. Т. 10. Л., 1933. С. 143–151.
18. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А. Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа // География и природ. ресурсы. 2014. № 3. С. 32–39.
19. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденеева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России // География и природ. ресурсы. 2017. № 2. С. 27–36.
20. ЕСИМО (Единая Система мониторинга Мирового океана). Центр океанографических данных ВНИИГМИ-МЦД. [Электронный ресурс]. URL: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения 28.04.2020).
21. Зайков Б.Д. Средний сток и его распределение в году по территории СССР // Тр. НИУ ГУГМС. Сер. IV. Вып. 24. Л.; М., 1946. С. 67–95.
22. Карта фактического уровня воды в Финском заливе и реке Неве. Росгидромет. Северо-Западное УГМС. СПб., 2020. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.meteo.nw.ru/weather/lo\\_levelsd.php](http://www.meteo.nw.ru/weather/lo_levelsd.php) (дата обращения 28.04.2020).
23. Кокорев А.В., Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Программные средства автоматизации инженерных гидрологических расчетов. Руководство пользователя HydroStatCalc. СПб.: ГГИ, 2010. 45 с.
24. Коровин Е.П., Розанов А.Н. Почвы и растительность Средней Азии как естественная производительная сила // Тр. Средне-Азиатского гос. ун-та. Сер. XIIa. Вып. 17. 1938.
25. Кузин П.С. Карта испарения с поверхности речных бассейнов и водный баланс Европейской части СССР // Изв. ГГИ. № 68. 1934. С. 38–45.
26. Кузин П.С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 456 с.
27. Личков Б.Л. Естественные районы Украины. Киев, 1922. 61 с.
28. Лукьянович М.А. Генетическая и сезонная структуры речного стока континентов // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 125–133.
29. Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 274 с.
30. Львович М.И. Опыт классификации рек СССР // Тр. ГГИ. Вып. 6. 1938. С. 58–108.
31. Львович М.И. Элементы режима рек земного шара. М.: Гидрометеиздат, 1945. 126 с.
32. Национальный атлас России / Под ред. А.Н. Краюхина (Т. 1), В.М. Котлякова (Т. 2); отв. ред. Г.В. Поздняк. М.: Роскартография, 2004–2008.
33. Первухин М.А. Ландшафтоведение в СССР // Землеведение. Т. XL. Вып. 1. 1938. С. 66–77.
34. Речные бассейны Европейской части России. Казань: Казанский федеральный ун-т, Ин-т экологии и природопользования, 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://bassepr.kpfu.ru> (дата обращения 28.04.2020).
35. Савицкий П.И. Географические особенности России. Ч. I. 1927. 177 с.
36. Семенов-Тянь-Шанский В.П. Гидрологическая районизация Северной Евразии // Тр. первого всерос. гидрол. съезда. Л., 1925. С. 150–151.
37. Семенов-Тянь-Шанский В.П. Опыт гидрологического районирования Азиатской части СССР на основе построения климатических зон // Изв. ГГИ. 1933. № 57–58. С. 71–80.
38. Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 315 с.
39. Сукачев В. Н. Идея развития и фитоценология // Сов. ботаника. 1942. № 1–3. С. 5–17.
40. Троицкий В.А. Гидрологическое районирование СССР. М.; Л., 1948. 112 с.
41. Тутковский П.А. Природная районизация Украины. Киев, 1922.
42. Федосеев И.А. История проблемы классификации и районирования вод суши СССР. М., 2003. 160 с.
43. Фролова Н.Л., Григорьев В.Ю., Киреева М.Б., Харламов М.А. Анализ изменения стока рек Европейской территории России по дистанционным и наземным данным // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. Воронеж, 2019. С. 520–525.
44. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Повалишников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории и его изменение // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 4–20.
45. Центр Регистра и Кадастра: информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 28.04.2020)
46. Allchin M. Characterisation and Classification of Hydrological Catchments in Alberta, Canada Using Growing Self-Organising Maps // Proc. 23rd GIS Res. UK (GISRUK) Conf Univ. Leeds. 2015. P. 55–63. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1491375>.
47. AllRivers: уровень воды онлайн. [Электронный ресурс]. URL: <https://allrivers.info> (дата обращения 28.04.2020)
48. Aschwanden H., Weingartner R. Die Abflussregimes der Schweiz. Bern: Geographisches Ins. Univ. Bern, Publ. Gewässerkunde, 1985. V. 65. 237 p.

49. *Auder B., Fischer A.* Projection-based curve clustering // *J. Statistical Computation and Simulation*. 2012. V. 82. Iss. 8. P. 1145–1168.  
<https://doi.org/10.1080/00949655.2011.572882>
50. *Bejarano M., Marchamalo M., Garcia de Jalon D., González del Tánago M.* Flow regime patterns and their controlling factors in the Ebro basin (Spain) // *J. Hydrol.* 2010. V. 385. P. 323.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.001>
51. *Berhanu B.B., Seleshi Y., Demisse S.S., Melesse A.M.* Flow Regime Classification and Hydrological Characterization: A Case Study of Ethiopian Rivers // *Water*. 2015. V. 7. P. 3149–3165.  
<https://doi.org/10.3390/w7063149>
52. *Blöschl G., Hall J., Parajka J. et al.* Changing climate shifts timing of European flood // *Sci.* 2017. V. 357. Iss. 6351. P. 588–590.  
<https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
53. *Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al.* Changing climate both increases and decreases European river floods // *Nature*. 2019. № 573. P. 108–111.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
54. *Bower D., Hannah D.M., McGregor G.R.* Techniques for assessing the climatic sensitivity of river flow regimes // *Hydrol. Processes*. 2004. V. 18. P. 2515–2543.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.1479>
55. CatchX – Catchment Water Explorer App. [Электронный ресурс]. URL: <https://ewgis.org/catchx-global/> (дата обращения 28.04.2020)
56. *Dallaire C.O., Lehner B., Sayre R., Thieme M.* A multidisciplinary framework to derive global river reach classifications at high spatial resolution // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. № 2. 024003.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad8e9>
57. *Danielson J.J., Gesch D.B.* Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). U.S. Geol. Survey. 2011. 26 p.
58. *Dettinger M.D., Diaz H.F.* Global characteristics of stream flow seasonality and variability // *J. Hydrometeorol.* 2000. V. 1. P. 289–310.  
[https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2000\)001<0289:GCOSFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2000)001<0289:GCOSFS>2.0.CO;2)
59. Ecrins (European catchments and rivers network system). EU Open Data Portal, European Environment Agency [Электронный ресурс]. URL: [https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/data\\_european-catchments-and-rivers-network](https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/data_european-catchments-and-rivers-network) (дата обращения 28.04.2020)
60. *Finlayson B.L., McMahon T.A.* Australia vs. the World: a comparative analysis of stream flow characteristics // *Fluvial Geomorphology of Australia / Ed R.F. Werner*. Sydney: Acad. Press, 1988. P. 17–40.
61. FluentHydro. [Электронный ресурс]. URL: <http://185.204.0.167/portal/map.html> (дата обращения 28.04.2020).
62. *Gharari S., Hrachowitz M., Fenicia F., Savenije H.H.G.* Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 3275–3291.  
<https://doi.org/10.5194/hess-15-3275-2011>
63. GitHub: размещение пакетных приложений и разработок ГитХаб. GitHub Inc., 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com> (дата обращения 28.04.2020)
64. GloRiC Version 1.0 [Электронный ресурс]. URL: [www.hydrosheds.org/page/gloric](http://www.hydrosheds.org/page/gloric) (дата обращения 10.02.2020)
65. *Haines A.T., Finlayson B.L., McMahon T.A.* A global classification of river regimes // *Applied Geography*. 1988. V. 8. P. 255–272.
66. Hydrological Atlas of Switzerland [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hydrologischeratlas.ch> (дата обращения 26.04.2020)
67. HydroOffice: Software for hydrology, meteorology, geoscience a data science. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hydrooffice.org> (дата обращения 28.04.2020)
68. HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hydrosheds.org/> (дата обращения 28.04.2020)
69. *Kennard M.J., Pusey B.J., Olden J.D., Mackay S.J., Stein J.L., Marsh N.* Classification of natural flow regimes in Australia to support environmental flow management // *Freshwater Biol.* 2010. V. 55. P. 171–193.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02307.x>
70. *Kireeva M., Frolova N., Rets E., Samsonov T., Entin A., Kharlamov M., Telegina E., Povalishnikova E.* Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period // *Int. J. River Basin Management*. 2019. P. 1–12.  
<https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1695258>
71. *Kratzert F., Klotz D., Shalev G., Klambauer G., Hochreiter S., Nearing G.* Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2019. V. 23. P. 5089–5110.  
<https://doi.org/10.5194/hess-23-5089-2019>
72. *Kuentz A., Arheimer B., Hundecha Y., Wagener T.* Understanding hydrologic variability across Europe through catchment classification // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. V. 21. P. 2863–2879.  
<https://doi.org/10.5194/hess-21-2863-2017>
73. *Kyoung J.L., Bernard A.E., Zhenxu T., Joongdae C., Ki-Sung K., Suresh M., Dibyajyoti T.* Automated Web GIS Based Hydrograph Analysis Tool, WHAT // *J. Am. Water Resour. Association*. 2005. V. 41(6). P. 1407–1416.
74. *Lane B.A., Dahlke H.E., Pasternack G.B., Sandoval-Solis S.* Revealing the Diversity of Natural Hydrologic Regimes in California with Relevance for Environ-

- mental Flows Applications // JAWRA. 2016. P. 1–20. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12504>
75. *Mackay S.J., Arthington A.H., James C.S.* Classification and comparison of natural and altered flow regimes to support an Australian trial of the Ecological Limits of Hydrologic Alteration framework // *Ecohydrodrol.* 2014. V. 7. Iss. 6. P. 1485–1507. <https://doi.org/10.1002/eco.1473>
76. *Mathews R., Richter B.D.* Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting // JAWRA. 2007. V. 43. P. 1400–1413. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00099.x>
77. *Matias Y.* Keeping people safe with AI-enabled flood forecasting // Google the Keyword, retrieved 2018-09-24. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.blog.google/products/search/helping-keep-people-safe-ai-enabled-flood-forecasting/> (дата обращения 28.04.2020)
78. *Matti B., Dahlke H.E., Dieppois B., Lawler D.M., Lyon S.W.* Flood seasonality across Scandinavia – Evidence of a shifting hydrograph? // *Hydrol. Processes.* 2017. V. 31. Is. 24. P. 4354–4370. <https://doi.org/10.1002/hyp.11365>
79. *Matti B., Dahlke H.E., Lyon S.W.* On the variability of cold region flooding // *J. Hydrol.* 2016. V. 534. P. 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.055>
80. *McMahon T., Vogel R.M., Peel M.C., Pegram G.G.S.* Global stream flows – Part 1: Characteristics of annual stream flows // *J. Hydrol.* 2007. V. 347. P. 243–259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.002>
81. *McManamay R.A., Orth D.J., Dolloff C.A., Frimpong E.A.* A regional classification of unregulated stream flows: spatial resolution and hierarchical frameworks // *River Res. Applic.* 2011. V. 28. Iss. 7. P. 1019–1033. <https://doi.org/10.1002/rra.1493>
82. *Merz B., Dung N.V., Apel H., Gerlitz L., Schröter K., Steirou E., Vorogushyn S.* Spatial coherence of flood-rich and flood-poor periods across Germany // *J. Hydrol.* 2018. V. 559. P. 813–826. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.082>
83. *Mudelsee M., Börngen M., Tetzlaff G., Grünwald U.* No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe // *Nature.* 2003. V. 425. P. 166–169. <https://doi.org/10.1038/nature01928>
84. *Hydrology: A Science of Nature / Eds Musy A., Higy C.* Boca Raton: Taylor & Francis Group. CRC Press, 2010. 346 p. <https://doi.org/10.1201/b10426>
85. Natural Resources Canada. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/resources/maps> (дата обращения 02.04.2020)
86. *Nevo S.A.* Summary of the Google Flood Forecasting Meets Machine Learning Workshop // Google AI Blog: The latest news from Google AI. 2019. March 18. [Электронный ресурс]. URL: <https://ai.googleblog.com/2019/03/a-summary-of-google-flood-forecasting.html> (дата обращения 28.04.2020)
87. *Nováky B., Bálint G.* Shifts and modification of the hydrological regime under climate change in Hungary // *Climate Change – Realities, Impacts Over Ice Cap, Sea Level and Risks.* 2013. P. 163–190. <https://doi.org/10.5772/54768>
88. *Olden J., Kennard M., Pusey B.* A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology // *Ecohydrodrol.* 2012. V. 5. P. 503–518. <https://doi.org/10.1002/eco.251>
89. *Olden J.D., Poff N.L.* Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes // *River Res. Applications.* 2003. V. 19. P. 101–121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>
90. OpenForecast. Веб-портал по общедоступному гидрологическому прогнозированию [Электронный ресурс]. URL: <https://openforecast.github.io> (дата обращения 28.04.2020)
91. *Oueslati O., De Girolamo A.M., Abouabdillah A., Porto A.L.* Attempts to flow regime classification and characterisation in Mediterranean streams using multivariate analysis // *Int. Workshop “Advances in statistical hydrology”.* Taormina, Italy, 2010. P. 1–15.
92. *Pinskwar I., Kundzewicz Z.W., Peduzzi P., Brakenbridge G.R., Stahl K., Hannaford J.* Changing Floods in Europe // *Changes in Flood Risk in Europe / Ed. Kundzewicz Z.W.* Wallingford, UK: IAHS Press, 2012. P. 83–96.
93. *Poff L., Ward V.* Implications of Streamflow Variability and Predictability for Lotic Community Structure: A Regional Analysis of Streamflow Patterns // *Can. J. Fisheries and Aquatic Sci.* 1989. V. 46. P. 1805–1817. <https://doi.org/10.1139/f89-228>
94. *Renard B., Lang M., Bois P., Dupeyrat A., Mestre O., Niel H., Sauquet E., Prudhomme C., Parey S., Paquet E., Neppel L., Gailhard J.* Regional methods for trend detection: assessing field significance and regional consistency // *Water Resour. Res.* 2008. V. 44. P. W08419. <https://doi.org/10.1029/2007WR006268>
95. *Sanborn S.C., Bledsoe B.P.* Predicting streamflow regime metrics for ungauged streams in Colorado, Washington, and Oregon // *J. Hydrol.* 2006. V. 325. P. 241–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.018>
96. *Sawicz K., Wagener T., Sivapalan M., Troch P.A., Carrillo G.* Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. V. 15. P. 2895–2911. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2895-2011>
97. *Sjöberg Y., Frampton A., Lyon S.W.* Using streamflow characteristics to explore permafrost thawing in northern Swedish catchments // *Hydrogeol. J.* 2013.

- V. 21(1). P. 121–131.  
<https://doi.org/10.1007/s10040-012-0932-5>
98. *Snelder T.H., Booker D.J.* Natural flow regime classifications are sensitive to definition procedures // *River Res. Applic.* 2012. V. 29. Iss. 7. P. 822–838.  
<https://doi.org/10.1002/rra.2581>
99. *Stahl K., Tallaksen L.M., Hannaford J., van Lanen H.A.J.* Filling the white space on maps of European runoff trends: estimates from a multi-model ensemble // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012. V. 16. P. 2035–2047.  
<https://doi.org/10.5194/hess-16-2035-2012>
100. The Nature Conservancy. Indicators of Hydrologic Alteration. Version 7.1. User's manual. Virginia, Arlington, 2009. 75 p.
101. *Vormoor K., Lawrence D., Schlichting L., Wilson D., Wong W.K.* Evidence for changes in the magnitude and frequency of observed rainfall vs. snowmelt driven floods in Norway // *J. Hydrol.* 2016. V. 538. P. 33–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.066>
102. WHAT: Web-based Hydrograph Analysis Tool. [Электронный ресурс]. URL: <https://engineering.purdue.edu/mapserve/WHAT/> (дата обращения 28.04.2020)
103. *Wilson D., Hannah D.* Spatial and temporal variability of UK river flow regimes // *IAHS-AISH Publication.* 2002. № 274. P. 457–464.
104. *Wrzesiński D., Sobkowiak L.* Detection of changes in flow regime of rivers in Poland // *J. Hydrol. Hydro-mech.* 2018. V. 66. № 1. P. 55–64.  
<https://doi.org/10.1515/johh-2017-0045>

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ  
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЫСТРОРАЗВИВАЮЩИХСЯ ПАВОДКОВ  
НА МАЛЫХ РЕКАХ СЕВЕРНОГО КAVKAZA С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СОВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ<sup>1</sup>

© 2021 г. Е. С. Васильева<sup>a, \*</sup>, П. А. Белякова<sup>a, b</sup>, А. И. Алексюк<sup>a, c</sup>,  
Н. В. Селезнева<sup>d</sup>, В. В. Беликов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>b</sup>Тихоокеанский институт географии ДО РАН, Владивосток, 690041 Россия

<sup>c</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, механико-математический факультет, Москва, 119991 Россия

<sup>d</sup>ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург, 198035 Россия

\*e-mail: [vasilevaes@yandex.ru](mailto:vasilevaes@yandex.ru)

Поступила в редакцию 31.01.2020 г.

После доработки 25.09.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Приведены примеры численного моделирования быстроразвивающихся дождевых паводков в горных районах на основании фактических и прогнозных данных об осадках и сопоставление рассчитанных гидрографов с данными гидрометеорологической сети и расчетами других авторов. Исследования проводились по двум моделям: STREAM 2D CUDA, основанной на численном решении уравнений мелкой воды в двухмерной (плановой) постановке по оригинальному алгоритму; и KW-GIUN-модели геоморфологического мгновенного единичного гидрографа, основанной на уравнении кинематической волны. Новые в гидрологии научные результаты — прямое численное моделирование уровенных режимов прохождения паводковой волны, а также учет в динамическом режиме аккумуляции части паводкового стока водохранилищами-ловушками. Сделан вывод, что обе модели могут эффективно использоваться для прогнозирования дождевых паводков при наличии надежных данных об осадках.

*Ключевые слова:* прогнозный расчет, быстроразвивающийся паводок, водосборный бассейн, численное моделирование, водохранилища-ловушки.

**DOI:** 10.31857/S0321059621020164

## ВВЕДЕНИЕ

Катастрофические дождевые паводки проходят на Северном Кавказе регулярно. Наиболее сильными за последние годы были наводнения в 2002 г. в бассейнах рек Кубани, Терека и под Новороссийском; в 2012 г. в Новороссийске, Геленджике и Крымске [1, 3], в 2018 г. в Туапсе и Апшеронском районе Краснодарского края. Такая гидрологическая ситуация требует совершенствования методов прогнозирования экстремальных наводнений и защиты от них.

<sup>1</sup> Исследование в части моделирования паводков и интерпретации результатов выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект 17-77-30006); обработка данных региональной автоматизированной системы мониторинга паводковой ситуации Краснодарского края выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Краснодарского края (научный проект 19-45-233007).

Экстремальный дождевой паводок в бассейне р. Адагум 6–7 июля 2012 г. привел к катастрофическому затоплению г. Крымска [5], погибло более 150 человек, экономический ущерб составил 20 млрд руб. [8]. Гидрологическая ситуация в бассейне р. Адагум в литературе характеризуется как “быстро развивающийся паводок” [2]. Для изучения этого выдающегося гидрологического события коллективом специалистов под руководством М.В. Болгова в 2013 г. был выполнен комплекс работ по реконструкции паводка [2]. Для расчета стока с водосбора р. Адагум в [2] использован программный комплекс SWMM (модель управления ливневым стоком) [16]. Результаты численного моделирования затопления г. Крымска с учетом детальной городской инфраструктуры изложены в работах [11, 18].

В настоящей работе исследуется возможность применения современных методов численного

моделирования формирования паводкового стока в сочетании с фактической и прогнозной гидрометеорологической информацией для прогнозирования динамики быстроразвивающихся паводков в горных и предгорных районах. Проводилось сопоставление результатов расчетов по программам STREAM 2D CUDA и KW-GIUN с данными натурных измерений и расчетов [2]. Впервые совместные расчеты по указанным двум программам были описаны в работе [19] применительно к водосбору р. Дюрсо, но там приведена только косвенная проверка достоверности данных моделирования.

Дополнительно с помощью программного комплекса STREAM 2D CUDA выполнены расчеты водохранилищ-ловушек с высотой плотин до 20 м, которые размещались на водосборе р. Адагум для срезки максимальных расходов. Целью данного исследования была оценка того объема стока, который может быть аккумулирован в водохранилищах-ловушках при прохождении дождевого паводка в бассейне р. Адагум.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Расчеты проводились с использованием модели геоморфологического мгновенного единичного гидрографа KW-GIUN [6, 17], основанной на уравнении кинематической волны, и программного комплекса STREAM 2D CUDA [9], основанного на численном решении уравнений мелкой воды в двухмерной (плановой) постановке.

Модель KW-GIUN (одна из моделей типа единичного гидрографа) обобщенно описывает процесс стекания воды по водосбору. Предполагается, что осадки выпадают над водосбором с равномерной интенсивностью, независимо и случайным образом капли дождя попадают в русловую сеть и достигают замыкающего створа по некоторому пути за определенное время. Единичный мгновенный гидрограф обобщает совокупность таких путей в данный момент времени и может быть рассчитан по геоморфологическим характеристикам этого водосбора с применением порядкового подхода. Время добегающего по склонам и руслам выражается через модификацию уравнения кинематической волны. Благодаря этому в модели отражена нелинейность стокоформирующих процессов – отклик бассейна на более сильный дождь наступает значительно быстрее, чем на более слабый, а величина пикового расхода паводка возрастает нелинейно с увеличением интенсивности дождя [6, 15]. Временной шаг моделирования  $\leq 1$  ч. В данном случае временной шаг составил 1 ч из-за такой же дискретности исходных данных об осадках.

В последней версии STREAM 2D CUDA реализован оригинальный алгоритм, основанный на

точном и единственном решении задачи Римана о распаде произвольного разрыва для уравнений мелкой воды [13, 12] и распараллеленный на графическом процессоре NVIDIA с использованием технологии CUDA для ускорения вычислений. Этот алгоритм верифицирован на большом числе тестовых задач и реальных объектов. Расчеты проводятся на нерегулярных сетках треугольно-четырёхугольной структуры, покрывающих всю площадь водосбора и адаптированных под русловую сеть. В результате расчетов получают не только расходы воды в заданных створах (как обычно в гидрологических моделях), но и скорости течения, глубины и отметки водной поверхности в любой точке водосбора. При этом учитывается взаимодействие водного потока с гидротехническими и другими сооружениями, расположенными в расчетной области.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЫСТРОРАЗВИВАЮЩИХСЯ ПАВОДКОВ НА ВОДОСБОРЕ р. ЗАПАДНЫЙ ДАГОМЫС

Объектом исследования был водосбор р. Западный Дагомыс, площадь которого составляет 49,0 км<sup>2</sup>. Максимальная высота на водоразделе составляет 935 м (г. Максимовка).

Исходные данные для моделирования следующие:

высотные отметки HydroSHEDS – скорректированные растры радарной топографической съемки SRTM с разрешением 3 угловых секунды;

часовой ход осадков по данным автоматической метеостанции Солох-аул (37092) за периоды с 25 по 26 июня 2015 г. и с 23 по 25 октября 2018 г.;

уровни воды с гидропостов (ГП): р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс, АГК-159, АГК-186).

Данные об осадках и уровнях воды были предоставлены Специализированным центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей. Уровни воды имели нерегулярный шаг – 2, 4, 8 ч в зависимости от интенсивности изменения уровней воды и были приведены к единой часовой дискретности с привлечением 10-минутных данных региональной автоматизированной системы мониторинга паводковой ситуации на реках Краснодарского края [10]. Проводилось сопоставление измерений по всем доступным данным, определялось время добегающего волны между пунктами наблюдений (на р. Западный Дагомыс между АГК-186 сети Эмерсит и ГП Росгидромета время добегающего – 30 мин). Для периодов паводков с учетом времени добегающего строились регрессионные зависимости, по которым были восстановлены недостающие отметки уровня воды в створах ГП Росгидромета. Восстановление детального хода уровня воды особенно важно для моделирования быстрораз-

вивающихся паводков, когда интенсивность подъема уровней воды достигает 2 м/ч.

Переход от уровней воды к расходам воды проводился с использованием кривой  $Q(H)$ , построенной по данным срочных наблюдений за конкретный год и результатам нивелировки уровней высоких вод выдающихся паводков.

#### *Построение цифровой модели рельефа водосбора*

Цифровая модель водосбора (ЦМП) построена на основе матрицы высот HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales), которая, в свою очередь, является гидрографическим продуктом совместного проекта WWF и USGS на основе данных SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с пространственным разрешением 3 угловых секунды. Речная сеть построена с использованием инструментов программного комплекса ArcGIS пакета Spatial Analyst – Hydrology. Принято пороговое значение площади водосбора для образования постоянного водотока для рек Черноморского побережья Кавказа – 0.5 км<sup>2</sup>, оно обеспечивает близкое соответствие расчетной речной сети водотокам, нанесенным на карты масштаба 1 : 100 000, и сведениям о количестве и суммарной длине притоков, приведенным в Гидрологической изученности [7]. Для модели STREAM 2D CUDA задание порогового значения не требуется, но дополнительно проводилась коррекция рельефа путем понижения отметок на 2 м в руслах рек.

#### *Схематизация водосбора р. Западный Дагомыс*

Численная модель STREAM 2D CUDA строилась на всем водосборе р. Западный Дагомыс, включая участок реки после слияния с р. Восточный Дагомыс и прибрежный (до 250 м) участок Черного моря, что диктовалось выбором простого граничного условия на выходной границе модели – уровня моря. Модель KW-GIUN адаптирована для водосбора р. Западный Дагомыс – Дагомыс.

Для модели STREAM 2D CUDA строилась гибридная треугольно-четырёхугольная расчетная сетка, адаптированная под плановые очертания речной сети. Вдоль русел рек строилась четырёхугольная сетка в одну ячейку поперек русла, остальная область покрывалась треугольной сеткой. Задавались две расчетные границы: 1 – выходная в Черном море, 2 – контрольная в створе ГП р. Западный Дагомыс – Дагомыс. Контрольные точки задавались для трех гидропостов: р. Западный Дагомыс – ГП Дагомыс, АГК-159, АГК-186 (рис. 1).

#### *Результаты моделирования паводков 25–26 июня 2015 г. и 23–25 октября 2018 г.*

На первом этапе исследований на модели STREAM 2D CUDA проводились расчеты по подбору оптимальных значений коэффициентов шероховатости русла и склонов водосбора р. Западный Дагомыс. Аналогичные расчеты проводились на модели KW-GIUN. Наиболее полное совпадение расчетных и измеренных гидрографов у обеих моделей получено при  $n_{\text{рус}} = 0.03$  и  $n_{\text{пойм}} = 0.1$  (рис. 2).

На модели STREAM 2D CUDA при калибровке проводилось также сравнение измеренных уровней воды на гидропостах с полученными в ходе расчетов (модель KW-GIUN рассчитывает только расходы воды). На рис. 3 показан ход уровней воды на ГП Западный Дагомыс для паводка 2015 г. и на АГК-159 для паводка 2018 г. Видно, что для ГП АГК-159, расположенного в верхней части водосбора, наилучшее совпадение результатов получено для коэффициента шероховатости в русле 0.1. Тогда как для ГП Западный Дагомыс, расположенного в выходном створе водосбора, лучшее совпадение с натурными данными дает русловая шероховатость, равная 0.03. Такое изменение коэффициента шероховатости по длине русла с уменьшением от верховьев к устью представляется вполне обоснованным, поскольку в верховьях горной реки русло сложено более крупными фракциями, что определяет повышенную относительную шероховатость дна, а следовательно – повышенный коэффициент шероховатости.

На втором этапе исследований при принятых значениях коэффициентов шероховатости проводилось сопоставление моделей STREAM 2D CUDA и KW-GIUN для паводков июня 2015 г. и октября 2018 г. (рис. 4).

При моделировании дождевого паводка 25 июня 2015 г. (рис. 4а) обе модели – STREAM 2D CUDA и KW-GIUN – показали пиковые значения расходов воды, близкие к максимальному наблюдаемому (366 м<sup>3</sup>/с), а именно – 355 и 327 м<sup>3</sup>/с соответственно. Можно отметить некоторое отставание времени прохождения пика (на 1.5 и 1 ч соответственно) у модельных расчетов относительно фактического времени. Модель STREAM 2D CUDA показывает начало подъема паводка чуть с большей задержкой, чем модель KW-GIUN. Ветвь спада модели описывают схожим образом, быстро срабатывая русловые запасы воды в нижней части графика, тогда как в реальности сток уменьшается не столь интенсивно за счет увеличения запасов воды в бассейновой емкости.

Паводок 24–25 октября на р. Западный Дагомыс (рис. 4б) имел 5 пиков вслед за ходом осадков. Первая волна паводка была сильно завышена обеими моделями по сравнению с натурными

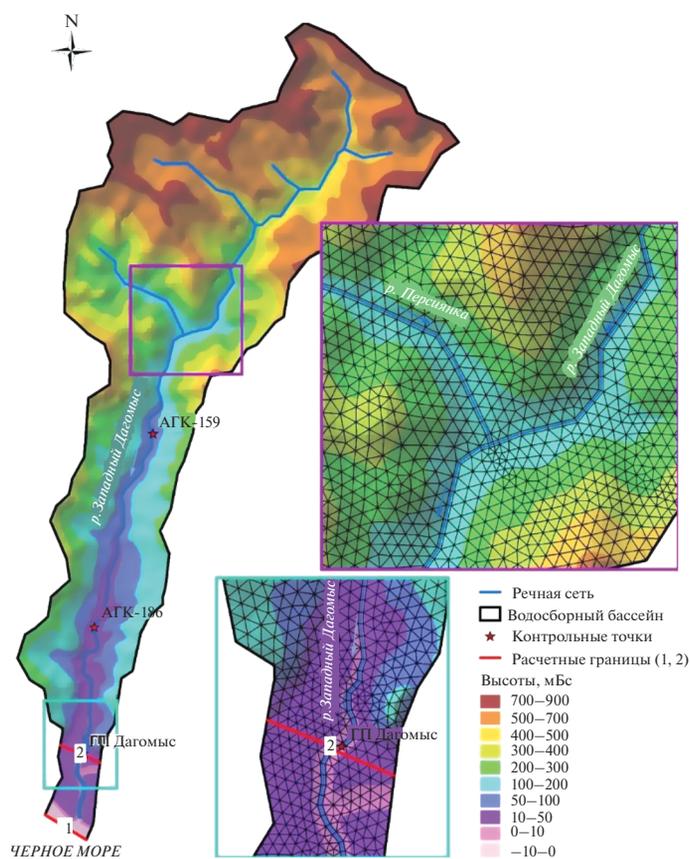


Рис. 1. Область моделирования р. Западный Дагомыс и фрагменты расчетной сетки модели STREAM 2D CUDA.

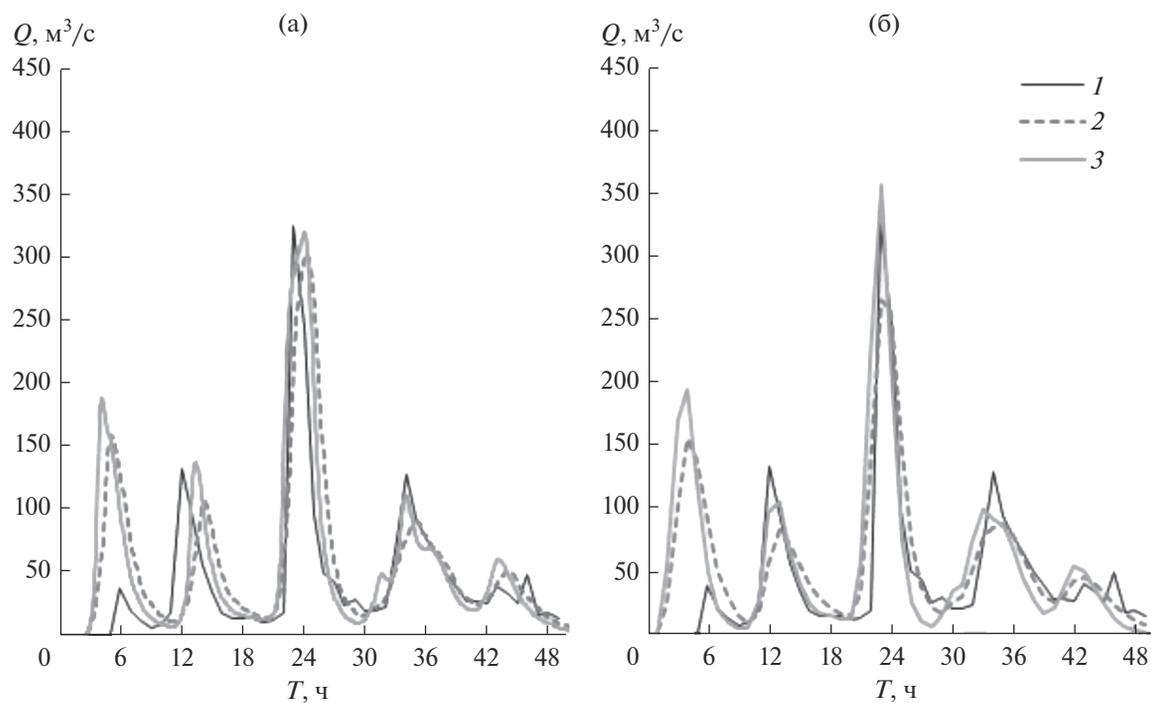
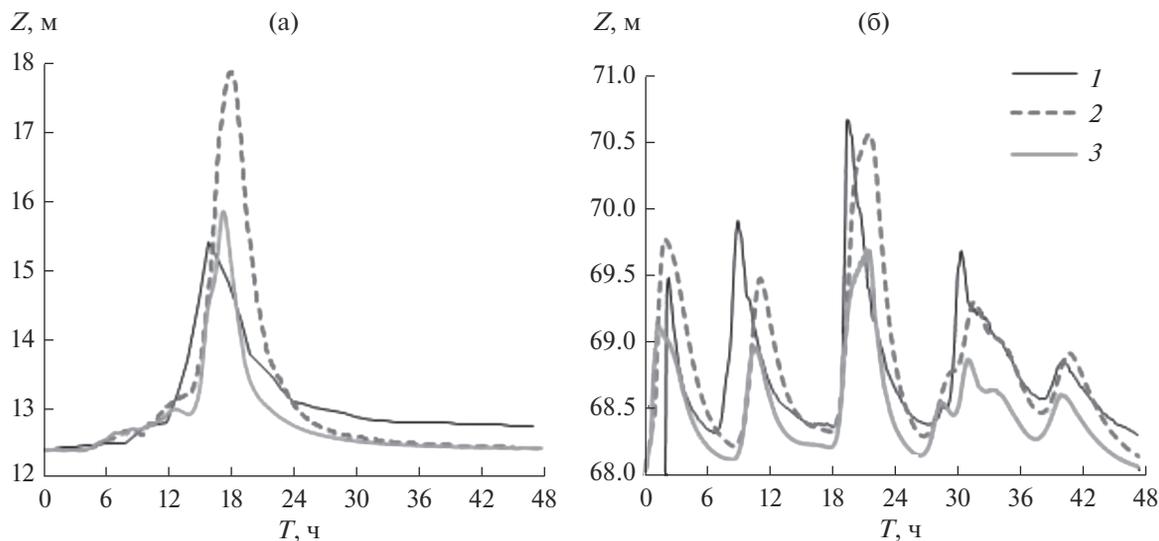
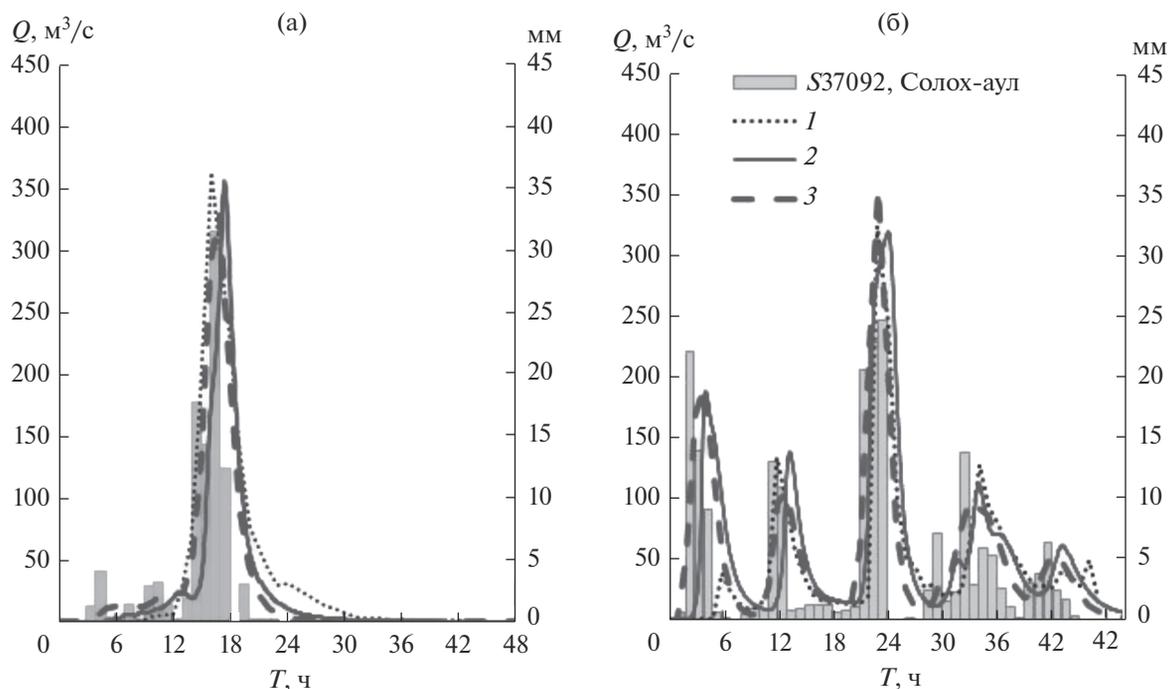


Рис. 2. Гидрографы расхода по измерениям (1), калибровочным расчетам подбора коэффициентов шероховатости  $n_p = 0.1$ ,  $n_n = 0.2$  (2) и  $n_p = 0.03$ ,  $n_n = 0.1$  (3): а – модель STREAM 2D CUDA, б – модель KW-GIUN.



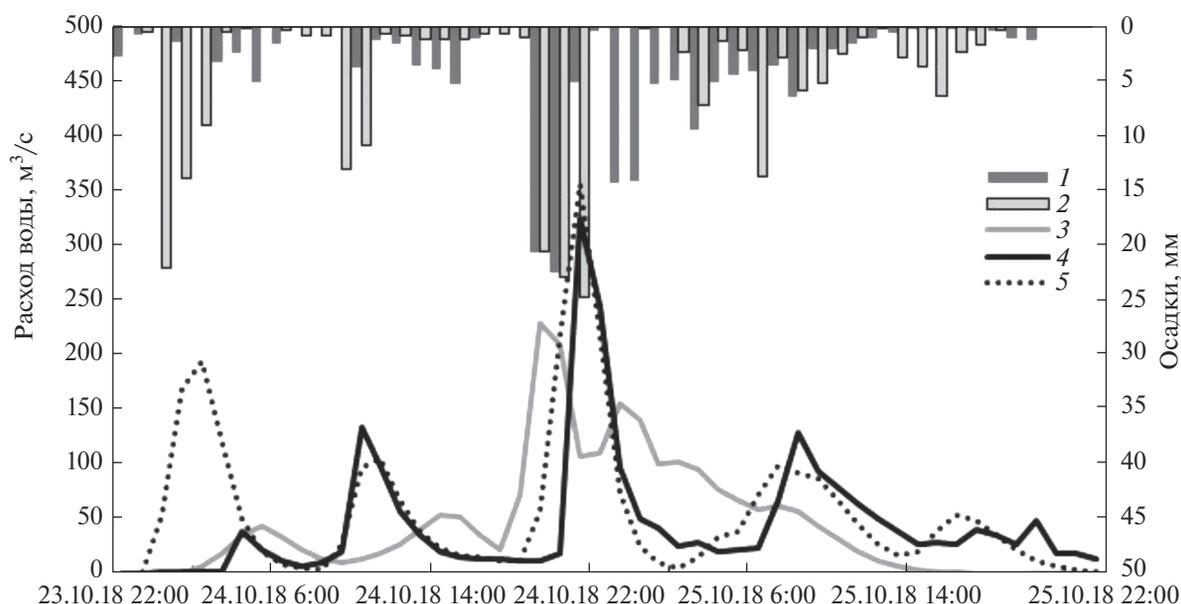
**Рис. 3.** Уровни воды на гидропостах: а – ГП “Западный Дагомис”, июнь 2015 г., б – АГК-159, октябрь 2018 г.; измерения (1), калибровочные расчеты по STREAM 2D CUDA для вариантов шероховатости  $n_p = 0.1$ ,  $n_{п} = 0.2$  (2) и  $n_p = 0.03$ ,  $n_{п} = 0.1$  (3).



**Рис. 4.** Сопоставление гидрографов расхода по данным измерений (1) и расчетов по STREAM 2D CUDA (2) и KW-GIUN (3): а – 2015 г., б – 2018 г.

данными. Эти расхождения обусловлены неучетом инфильтрации в расчетах, поскольку в начале паводка недонасыщенный влагой грунт интенсивно впитывает осадки, чем замедляет продвижение паводковой волны и ее интенсивность.

Наиболее высокий пик ( $325 \text{ м}^3/\text{с}$ ) пришелся на третью волну из-за усиления интенсивности осадков ( $>20 \text{ мм/ч}$  в течение 3 ч), смоделированный STREAM 2D максимальный расход воды составил  $320 \text{ м}^3/\text{с}$ , по модели KW-GIUN –  $356 \text{ м}^3/\text{с}$ .



**Рис. 5.** Сопоставление прогностических по модели COSMO-Ru7 (1) и фактических осадков 23–25 октября на АМС Солохаул (2), а также спрогнозированных по модели KW-GIUN расходов воды по прогностическим осадкам (3), расчетных по фактическим осадкам (4) и фактических расходов воды на ГП р. Западный Дагомис – Дагомис (5).

Время прохождения пика по модели KW-GIUN совпадает с фактическим (при шаге моделирования 1 ч), по модели STREAM 2D отстает на ~1 ч.

В целом модели удовлетворительно описывают динамику паводка. Разница максимальных расходов наиболее высоких паводков, полученных по обеим моделям, составляет 5–10% по сравнению с данными наблюдений, что лежит в пределах точности оценки самого максимального расхода в полевых условиях. Модель KW-GIUN несколько лучше описывает время прохождения пика, тогда как модель STREAM 2D более точно описывает максимальные расходы и кривую спада.

#### *Прогнозный расчет паводков 24–25 октября 2018 г. моделью KW-GIUN*

23 октября 2018 г. был выполнен прогноз паводка на р. Западный Дагомис по прогностическим осадкам базовой модели Гидрометцентра России COSMO-Ru7, экстраполированным в южную окрестность АМС Солох-Аул. На момент выпуска прогноза для водосбора р. Западный Дагомис была откалибрована только модель KW-GIUN на паводке 25 июня 2015 г. При шероховатости русла и склонов, равной 0.03 и 0.1, максимальный расход воды ( $Q = 229 \text{ м}^3/\text{с}$ ) ожидался в 19–20 ч 24 октября.

Сравнение сумм прогностических и измеренных осадков на метеостанции Солох-Аул (рис. 5) показало высокую воспроизводимость синоптической ситуации метеорологической моделью COSMO-Ru7. Согласно прогнозу, с 22 ч 23 октяб-

ря по 23 ч 25 октября ожидалась сумма осадков 132.5–183.8 мм в окрестностях АМС Солох-Аул, фактической слой на АМС составил 208.9 мм.

Фактический максимальный расход воды в Дагомисе по результатам нивелировки меток высоких вод был оценен в  $325 \text{ м}^3/\text{с}$ . Отметки опасного явления не были превышены, расход воды проходил по краю бровок русла. Прогностический расход KW-GIUN на основе прогностических осадков COSMO-Ru7 занижил максимальный расход на ~30%, что было связано с формой плювиограммы: очень сильные осадки интенсивностью >20 мм/ч прогнозировались в течение 2 ч, тогда как фактически они продолжались 3 ч. Многопиковый характер интенсивности дождя и вызванного им паводка был предсказан верно. Максимальный прогностический расход воды опередил наблюдаемый на 2 ч.

В случае идеального прогноза интенсивности осадков максимальный расход был бы рассчитан по модели KW-GIUN с завышением на  $30 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Q_{\text{расч}}$  на рис. 5).

Первый опыт прогноза гидрографа выявил несколько направлений дальнейшего улучшения прогноза: (1) необходимость максимально учитывать все возможные варианты хода осадков на основе полного массива сеточных осадков по основным прогностическим метеорологическим моделям; (2) развитие методов моделирования для рек с отсутствием наблюдений за стоком воды с переносом параметров моделей с изученных на неизученные водосборы; (3) установление зави-

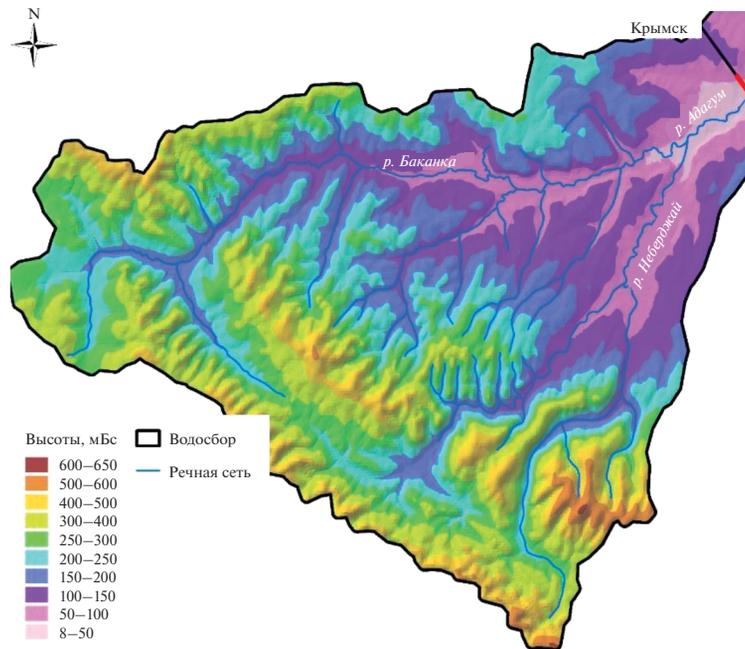


Рис. 6. ЦМР водосбора р. Адагум.

симостей между накоплением критической суммы осадков и событиями наводнений на реках Кавказа.

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ПАВОДКА 6–7 ИЮЛЯ 2012 г. НА ВОДОСБОРЕ р. АДАГУМ

##### *Общие сведения. Исходные данные*

Другим объектом моделирования был водосбор р. Адагум выше г. Крымска, площадь которого составляет 326 км<sup>2</sup>. Численная модель строилась на водосбор р. Адагум выше г. Крымска до створа железнодорожного моста, где задавалась выходная граница расчетной области. Моделирование проводилось для “бытовых” условий водосбора и при наличии водохранилищ-ловушек, перехватывающих часть стока.

Исходные данные для моделирования следующие:

высотные отметки HydroSHEDS;

часовой ход осадков на метеостанциях Крымск и Новороссийск за период с 06.07.2012 по 07.07.2012;

предполагаемое местоположение створов 14-ти водохранилищ-ловушек.

В ночь с 6 на 7 июля на метеостанции Новороссийск выпало 275 мм осадков, на метеостанции Крымск было измерено 156 мм. Это максимальные суточные суммы осадков, наблюдавшиеся за всю историю наблюдений на этих пунктах.

В связи с большой неравномерностью осадков было решено выполнить расчеты стока с водосбора р. Адагум на основе осредненных данных по обеим метеостанциям.

##### *Формирование цифровой модели рельефа*

ЦМР водосбора построена на основе матрицы высот HydroSHEDS аналогично водосбору р. Западный Дагомыс. Принятая пороговая величина площади водосбора для образования постоянного водотока для р. Адагум — 1.3 км<sup>2</sup>. ЦМР водосбора р. Адагум в “бытовых” условиях представлена на рис. 6.

Для варианта рельефа с водохранилищами-ловушками технология создания ЦМР следующая. По данным HydroSHEDS средствами ArcGIS строилась поверхность TIN, и проводилась локальная корректировка поверхности в створах водохранилищ-ловушек. Отметки гребней плотин назначались следующим образом: на рельефе в месте расположения створа будущей плотины определялись минимальные отметки, и к ним прибавлялась высота плотины, равная 10 и 20 м. Отметки уровня воды в водохранилищах принимались равными отметкам гребней плотин, по этим данным строилась еще одна поверхность TIN уровня воды. Далее выполнялось сопряжение двух поверхностей TIN базового рельефа уровня воды в водохранилищах; таким образом, были получены контуры водохранилищ. Исходные параметры водохранилищ-ловушек приведе-

**Таблица 1.** Исходные параметры водохранилищ-ловушек с плотинами высотой 10 и 20 м

Створы	Отметки гребня плотин	Площади, тыс. м <sup>2</sup>			Объем, млн м <sup>3</sup>		
		плотины высотой 10 м	плотины высотой 20 м	разница	плотины высотой 10 м	плотины высотой 20 м	разница
1	220	111.12	320.34	209.22	0.50	2.52	2.03
2	190	224.89	468.11	243.22	1.09	4.39	3.30
3	250	23.83	66.05	42.22	0.07	0.43	0.36
4	163	63.27	181.87	118.59	0.22	1.31	1.09
5	166	44.33	172.94	128.61	0.13	1.04	0.90
6	141	81.23	277.08	195.85	0.30	1.81	1.51
7	201	51.98	149.64	97.66	0.18	1.07	0.89
8	172	63.98	177.52	113.54	0.23	1.34	1.11
9	204	14.11	69.06	54.95	0.05	0.37	0.32
10	147	23.38	84.00	60.62	0.06	0.54	0.48
11	195	34.35	95.39	61.04	0.10	0.61	0.51
12	171	85.77	1032.77	946.99	0.28	9.49	9.21
13	143	134.98	353.88	218.90	0.51	2.82	2.31
14	240	14.68	26.88	12.21	0.07	0.19	0.12
Сумма		971.90	3475.53	2503.63	3.79	27.93	24.14

ны в табл. 1. Площади и объемы определены средними значениями ArcGIS при уровне воды, соответствующем проектным отметкам гребней плотин.

Суммарная площадь водохранилищ-ловушек при проектном уровне, образованных плотинами высотой 10 м, составляет ~0.3% общей площади водосбора, при плотинах высотой 20 м – 1.07%. Проектный объем водохранилищ-ловушек с плотинами высотой 20 м превышает объем водохранилищ с плотинами высотой 10 м более чем в 7 раз.

#### Схематизация модели STREAM 2D CUDA

Для существующих условий рельефа (без водохранилищ) и наличия двух вариантов водохранилищ-ловушек строилась единая численная модель. Для ее построения применялась треугольная расчетная сетка нерегулярной структуры, сгущенная к руслам рек, и более редкая – к краям водосбора. Расчетная сетка содержит 214898 ячеек с длинами сторон от 15 до 250 м. В модели построена одна расчетная граница на выходе в створе железнодорожного моста выше г. Крымска. Назначенные коэффициенты шероховатости по Маннингу – в руслах рек  $n = 0.03$ , на пойме  $n = 0.1$  – такие же, как и для водосбора р. Западный Дагомыс. В модели с водохранилищами-ловушками на расчетной области в местах их расположения дополнительно задавались 14 контрольных точек для фиксации расчетных параметров во время счета. Фрагменты расчетной сетки приведены на

рис. 7. Данные о рельефе переносились в центры ячеек расчетной сетки методом гармонической (несибсоновской) интерполяции ЦМР [14].

#### Результаты расчетов существующих условий рельефа водосбора р. Адагум

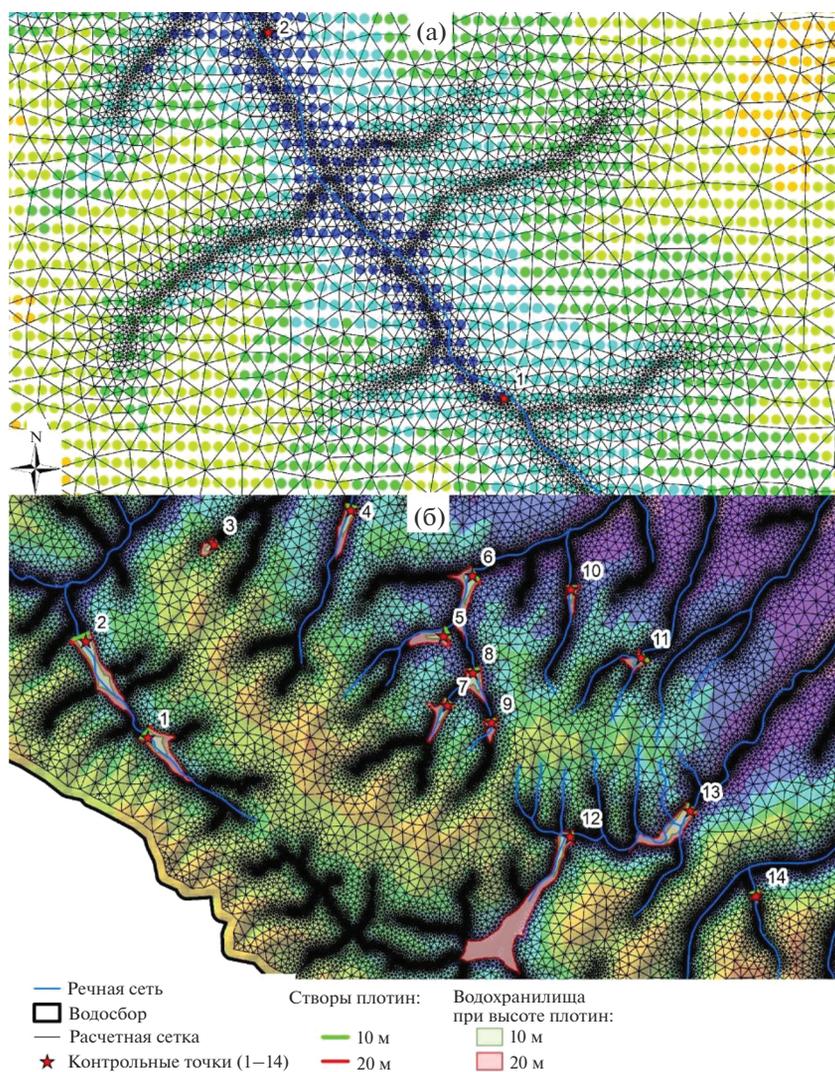
Моделирование стока в существующих условиях рельефа водосбора р. Адагум выполнялось на основе плювиограмм с метеостанций Крымск и Новороссийск за период с 06 по 07 июля 2012 г., а также по осредненным осадкам. Осадки распределялись равномерно по всей площади бассейна. Моделируемый временной интервал составил 48 ч.

На выходной границе модели (в створе железнодорожного моста) задавалось условие связи расходов и уровней воды:  $Q = f(H)$ , – оно сформировано приближенно с учетом фактических данных об уровнях воды в створе моста в ходе паводка 2012 г.

По результатам расчетов построены гидрографы расхода в выходном створе модели (створ железнодорожного моста выше г. Крымска). Ниже представлено сопоставление этих гидрографов с расчетами в [2] и расчетами по модели KW-GIUN [6, 17] (рис. 8).

Анализ результатов расчетов в существующих условиях показал следующее.

Объемы стока за паводок по моделям STREAM 2D и KW-GIUN совпадают (212 мм), а по модели SWMM [2] существенно меньше (91 мм), что, по-видимому, связано с учетом в по-



**Рис. 7.** Фрагменты расчетной сетки модели STREAM 2D CUDA и ЦМР водосбора р. Адагум для существующих условий рельефа (а) и наличия водохранилищ-ловушек (б).

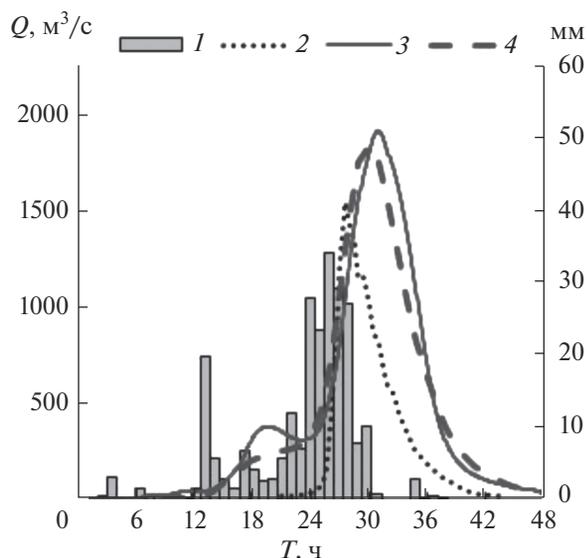
следней влагопотерь на инфильтрацию в почву. Поскольку перед “пиковыми” осадками сильный дождь шел непрерывно более 12 ч, такие влагопотери представляются завышенными. По оценкам В.Ю. Георгиевского и Ю.Ю. Ткаченко (с. 21 в [4]), выполненных по расчету водного баланса Варнавинского водохранилища с учетом притока р. Абин, слой стока в бассейне р. Адагум к г. Крымску за 6–7 июля 2012 г. составил 122 мм. Вероятно, слой стока в приведенных расчетах был завышен. В дальнейшем необходим учет потерь осадков за счет задания эффективных осадков для моделей STREAM 2D и KW-GIUN.

Гидрографы расходов и сами максимальные расходы по моделям STREAM 2D и KW-GIUN очень близки (1900 и 1840 м<sup>3</sup>/с соответственно, но при разных коэффициентах шероховатости), по

модели SWMM несколько меньше (1540 м<sup>3</sup>/с), что объясняется, в частности, существенно меньшим объемом стока.

Время прохождения пика (между 4 и 5 ч ночи 7 июля, или 27 ч от начала расчета) достаточно точно получено моделью SWMM, модель KW-GIUN задерживает пик на 2 ч, модель STREAM 2D задерживает пик на 3 ч. Последний результат может частично объясняться тем, что в модели STREAM 2D учитывается подпор от железнодорожной насыпи, расположенной в замыкающем створе модели, в силу чего происходят аккумуляция части расхода выше створа моста и задержка пика.

Модель SWMM совсем не дает стока в первые 12 ч паводка, когда осадки уже достаточно интенсивные.



**Рис. 8.** Гидрографы расхода с водосборной площади р. Адагум в створе железнодорожного моста, полученные по различным расчетным моделям. 1 – осредненные суммы осадков, 2 – расчет по модели [2], 3 – расчет по модели STREAM 2D, 4 – расчет по модели KW-GIUN.

#### Результаты расчетов водохранилищ-ловушек

Поскольку модель кинематической волны не позволяет учитывать влияние подпора и процесс

наполнения водохранилищ, расчеты проводились только на модели STREAM 2D CUDA. Рассматривались нерегулируемые плотины высотой 10 и 20 м.

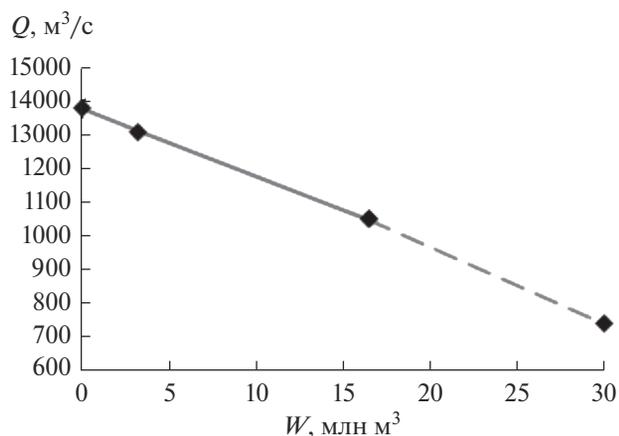
Результаты расчетов для вариантов нерегулируемых плотин высотой 10 и 20 м представлены в табл. 2, объемы водохранилищ вычислены средствами ArcGIS при уровнях воды в водохранилищах, полученных в расчетах. Общий объем накопленной в водохранилищах-ловушках воды при плотинах 20 м почти в 5 раз превышает суммарный объем при плотинах 10 м. Наполнение водохранилищ-ловушек с плотинами высотой 20 м происходит через 30–33 ч от начала расчетного времени или через 6–9 ч после пика дождевых осадков. С плотинами высотой 10 м наполнение водохранилищ-ловушек происходит ранее – уже через 25–26 ч от начала расчетного времени, или через 1–2 ч от пика осадков.

Зависимость максимальных расходов воды в замыкающем створе от суммарного фактического объема водохранилищ (с учетом частичного наполнения некоторых из них) имеет линейный характер (рис. 9). Нулевой объем водохранилищ соответствует бытовым условиям.

По проведенным расчетам можно сделать вывод о том, что водохранилища-ловушки с высотой плотин 20 м оказались более эффективными в сравнении с плотинами 10 м и могут обеспечить срезку максимального расхода на 30%, но следует

**Таблица 2.** Результаты расчетов для вариантов нерегулируемых плотин высотой 10 и 20 м

Створы	Плотины высотой 10 м			Плотины высотой 20 м		
	проектные отметки гребня плотин	параметры водохранилищ		проектные отметки гребня плотин	параметры водохранилищ	
		уровень воды по расчету	объем воды при расчетном уровне		уровень воды по расчету	объем воды при расчетном уровне
1	210	209.73	0.47	220	216.37	1.53
2	180	177.91	0.68	190	180.57	1.20
3	240	239.81	0.07	250	243.50	0.14
4	153	153.01	0.22	163	162.81	1.28
5	156	155.42	0.11	166	164.23	0.76
6	131	130.50	0.26	141	137.08	0.94
7	191	190.14	0.14	201	199.69	0.89
8	162	161.49	0.21	172	164.28	0.38
9	194	193.99	0.05	204	204.00	0.37
10	137	136.65	0.06	147	146.50	0.50
11	185	184.40	0.09	195	191.85	0.37
12	161	161.07	0.28	171	167.93	6.52
13	133	133.17	0.51	143	138.04	1.38
14	230	229.75	0.06	240	240.00	0.19
Сумма			3.19			16.45



**Рис. 9.** График зависимости максимальных расходов  $Q$  в выходном створе от суммарного объема воды  $W$ , аккумулируемого в водохранилищах-ловушках.

более детально проработать этот вопрос о расположении створов плотин, чтобы максимально использовать номинальный объем водохранилищ. Кроме того, необходимо иметь в виду потенциальную опасность прорыва плотин вследствие переполнения водохранилища и размыва сооружения. Такие неоднократные случаи известны в мире, в Краснодарском крае в 2002 г. произошел прорыв плотины в Дюрсо вследствие очень сильных осадков и быстрого переполнения водоема. Гидродинамические условия прорыва были воспроизведены в работе [19] с использованием модели STREAM 2D.

## ВЫВОДЫ

Для двух горных водосборов выполнено численное моделирование быстроразвивающихся дождевых паводков с применением модели STREAM 2D CUDA, основанной на численном решении двухмерных уравнений мелкой воды по оригинальному алгоритму, и модели единичного гидрографа KW-GIUN, основанной на уравнении кинематической волны. Получено хорошее совпадение рассчитанных гидрографов между собой и с натурными данными.

В рассмотренных авторами задачах по прогнозным расчетам быстроразвивающихся паводков проявилось некоторое преимущество модели STREAM 2D, которое заключается в возможности расчета по ней не только расходов воды, но и уровней водной поверхности как в заданных створах, так и по площади водосбора, а также в учете подпора от искусственных и естественных препятствий и аккумуляции части расхода в водохранилищах. С другой стороны, модель KW-GIUN оказалась менее чувствительной к точности задания водосборной поверхности и гораздо более

быстрой по времени выполнения расчета. Время расчета гидрографа паводка для рассмотренных задач на персональном компьютере составляет  $\sim 1$  ч для STREAM 2D CUDA и  $< 1$  мин для KW-GIUN.

Достаточно близкие к наблюдаемым результаты моделирования гидрографов показывают, что при наличии оперативных данных об осадках с часовым или более высоким разрешением возможно прогнозирование расходов и уровней воды в требуемых створах с заблаговременностью, равной времени добега (до нескольких часов в рассматриваемых случаях). При наличии оперативного количественного прогноза осадков проверенного качества возможно прогнозирование расходов и уровней воды быстроразвивающихся паводков с заблаговременностью метеорологического прогноза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Колтерманн П.К., Торопов П.А., Школьный Д.И., Белякова П.А. Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 3–17.
2. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Осипова Н.В. и др. Предотвращение катастрофических паводков и обеспечение безопасности территории Крымского района Краснодарского края. М.: ИВП РАН, 2013. 34 с.
3. Вишневская И.А., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Шапоренко С.И., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Голубчиков С.Н. Географо-гидрологическая оценка наводнений в российском Причерноморье // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 1. С. 131–146.
4. Катастрофический паводок в бассейне р. Адагум 6–7 июля 2012 г. и его причины. 2012. 42 с. [Электронный ресурс] <http://meteoweb.ru/biblio/27.pdf>
5. Котляков В.М., Лихачева Э.А., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Маккаев А.Н., Медведев А.А., Рудаков В.А. Наводнение 6–7 июля 2012 года в городе Крымске // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 6. С. 80–88.
6. Ли К.Т., Чен Н.К., Гарцман Б.И., Бугаец А.Н. Современная версия модели единичного гидрографа и ее применение в Тайване и России // География и природ. ресурсы. 2009. № 1. С. 144–151.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье / Под ред. Т.Н. Джанридзе. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 225 с.
8. Рожков А. Заявленный страховщикам ущерб от наводнения на Кубани превысил 1 млрд руб. // Ведомости: газета. 2012. 6 августа. № 145 (3159).
9. Свид. 2017660266 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологий Compute Unified Device

- Architecture (на графических процессорах NVIDIA) / Алексюк А.И., Беликов В.В. № 2017617252 заявл. 21.07.2017. Оpubл. 20.09.2017. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
10. Ткаченко Ю.Ю., Шержуков Е.Л. Опыт создания систем краткосрочного прогноза угроз гидрологического характера // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 3. С. 75–82.
  11. Alekseevskiy N.I., Krylenko I.N., Belikov V.V., Kochetkov V.V., Norin S.V. Numerical Hydrodynamic Modeling of Inundation in Krymsk on 6–7 July 2012 // Power Technology and Engineering. 2014. V. 48. Is. 3. P. 179–186.  
<https://doi.org/10.1007/s10749-014-0505-y>
  12. Alekseyuk A.I., Belikov V.V. Simulation of shallow water flows with shoaling areas and bottom discontinuities // Comput. Math. Math. Phys. 2017. V. 57. № 2. P. 318–339.
  13. Alekseyuk A.I., Belikov V.V. The uniqueness of the exact solution of the Riemann problem for the shallow water equations with discontinuous bottom // J. Comp. Phys. 2019. V. 390. P. 232–248.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.001>
  14. Belikov V.V., Semenov A.Y. Non-Sibsonian interpolation on arbitrary system of points in Euclidean space and adaptive isolines generation // Appl. Numer. Math. 2000. V. 32. № 4. P. 371–387.
  15. Gonchukov L.V., Bugaets A. N., Gartsman B.I., Lee K.T. Weather Radar Data for Hydrological Modelling: An Application for South of Primorye Region, Russia // Water Resour. 2019. V. 46. Suppl. 2. P. S25–S30.
  16. James W., Huber W.C. User System Models User's guide to SWMM. 2003. 700 p.
  17. Lee K.T., Yen B.C. Geomorphology and kinematic-wave based hydrograph deviation // J. Hydraul. Eng. 1997. V. 123. P. 73–80.
  18. Norin S.V., Belikov V.V., Alekseyuk A.I. Simulating Flood Waves in Residential Areas // Power Technol. Engineering. 2017. V. 51. № 1. P. 52–57.  
<https://doi.org/10.1007/s10749-017-0782-3>
  19. Vasil'eva E.S., Alekseyuk A.I., Belyakova P.A., Fedorova T.A., Belikov V.V. Numerical Modeling of the Behavior of a Destructive Rain Flood on a Mountain River // Water Resour. 2019. V. 46. Suppl. 1. P. 43–55.

УДК 504.455

ПЛОТНОСТЬ ЧАСТИЦ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ<sup>1</sup>© 2021 г. Ш. Р. Поздняков<sup>a</sup>, А. В. Ревунова<sup>a</sup>, \*<sup>a</sup>Институт Озероведения РАН, Санкт-Петербург, 196105 Россия

\*e-mail: reina\_abc@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2020 г.

После доработки 29.06.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Плотность частиц донных отложений водных объектов – важная характеристика, определяющая интенсивность взаимодействия придонной толщи воды с поверхностным слоем донных отложений, – в современных исследованиях не может приниматься постоянной величиной. Выполнена оценка вариабельности данного параметра для Ладожского озера. Изменчивость данной характеристики требует корректировки существующих методик гранулометрического анализа частиц донных отложений естественных водных объектов.

*Ключевые слова:* гидравлическая крупность, плотность твердых частиц, гранулометрический анализ, донные отложения Ладожского озера, органическая составляющая, донный рельеф.

DOI: 10.31857/S0321059621020103

Многие гидрофизические и гидрохимические процессы в водных объектах обусловлены в значительной степени взаимодействием водной массы с твердыми частицами, взвешенными в ней и отложившимися на дне. Интенсивность процессов такого взаимодействия определяется целым рядом характеристик твердых частиц. При этом один из важнейших показателей – их плотность и связанные с ней параметры, в частности гидравлическая крупность. В самом деле гидродинамическое и физико-химическое взаимодействие твердых частиц с окружающей водой в водных объектах, процессы взвешивания и осаждения наносов в определяющей степени зависят от их гидравлической крупности. Это относится как к взвешенным в толще воды частицам, так и к осаждаемым на дне твердым отложениям. Общепринятым термином “гидравлическая крупность”  $u$  (м/с) обозначают скорость равномерного падения частицы в неподвижной (невозмущенной) воде. Многочисленные классические теоретические и экспериментальные исследования гидравлической крупности частиц, начатые еще в середине XIX в. в работах Дж.Г. Стокса, получили свое интенсивное развитие во второй половине XX в. Здесь следует упомянуть фундаментальные исследования М.А. Великанова, В.Н. Гончарова,

А.В. Караушева и др. [1, 2, 5–7]. В результате были получены формулы и таблицы зависимости гидравлической крупности от диаметра частиц, температуры водной среды и формы частиц (для крупных наносов при турбулентном и переходном режиме осаждения [6]). На основе этих работ подготовлены методические рекомендации по практическому гранулометрическому анализу частиц, вошедшие в соответствующие Наставления и применяемые на сети Росгидромета [8]. Для мелких частиц с ламинарным режимом осаждения при этом, как правило, использовалась теоретическая зависимость Стокса [5]:

$$U = k_l g d^2 (\rho_s - \rho) / 4k_v \rho,$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_s$  – плотность частиц наносов, кг/м<sup>3</sup>;  $k_v$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения;  $d$  – диаметр равновеликого частице шара;  $k_l$  – постоянный коэффициент, принятый Стоксом для шарообразных частиц равным 0.22. Данная зависимость имела экспериментальное подтверждение в многочисленных исследованиях на протяжении всего XX в., например в [5].

При этом важно отметить следующее. Практически во всех разработках плотность твердых частиц, как правило, принималась постоянной и равной 2.65 г/см<sup>3</sup>. Это характерно для всех классических работ [1, 2, 6]. Исследований вариаций плотности твердых частиц естественных водоемов явно недостаточно даже в специальных работах [10]. При этом, если рассматривать, напри-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН (тема № 0154-2019-0003 “Разработка комплексных методов исследования и оценки характеристик твердых частиц в наномасштабном диапазоне размеров в водных объектах с различной степенью антропогенной нагрузки”).

**Таблица 1.** Вещества, образующие донные отложения, и их плотность

Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Пенопласт	0.2–0.4
Полипропилен	0.9
Поликарбонат	1.2
Поливинилхлорид	1.34–1.43
Кварц	2.2–2.65
Граниты	2.5–3.05
Алюминий	2.68
Мрамор	2.6–2.84
Слюда	2.6–3.2
Базальты	2.7–3.2
Апатит	3.1–3.2
Корунд	3.9–4.5
Пирит	5.0
Железо	7.87
Серебро	10.5
Золото	19.32

мер, донные отложения, то их формирование обусловлено целым рядом различных причин – поступлением в водный объект речных и эоловых наносов, продуктов абразии берегов, накоплением продуктов химических реакций, осаждением остатков отмирающих организмов (аллохтонных, т.е. поступающих в водный объект извне) и автохтонных (образующихся в самом водном объекте). Кроме того, особенности современного антропогенного воздействия обуславливают появление новых видов твердых частиц в водных объектах, например частиц микропластика. Все эти составляющие имеют очень широкий диапазон значений плотности. Плотность частиц наносов может достигнуть весьма больших величин при размывании текучей водой рудных жил, содержащих, например, серебро, золото или другие металлы. В

то же время твердые органические частицы имеют, как правило, меньшую плотность. Еще меньшую плотность могут иметь частицы микропластика (табл. 1).

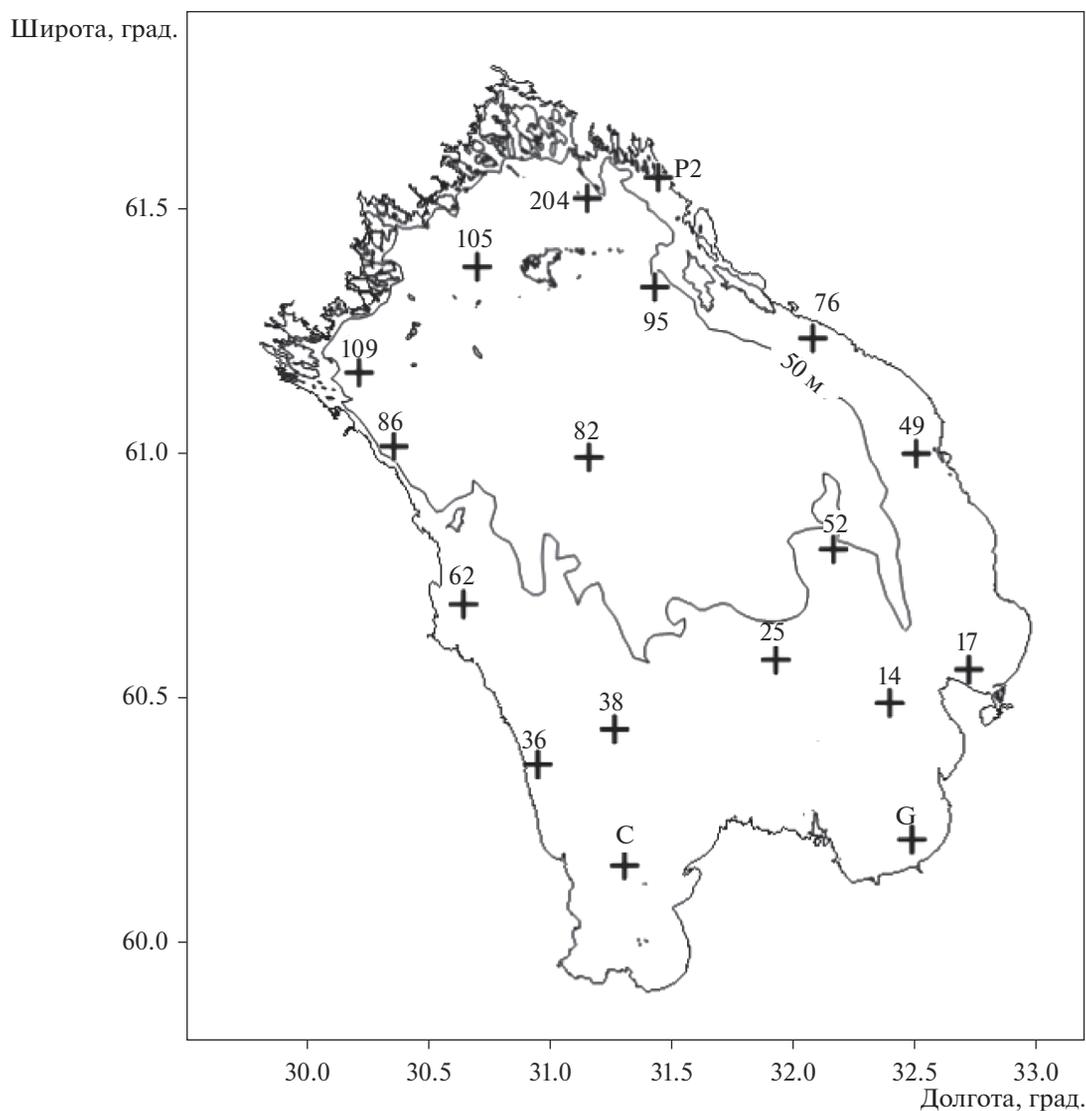
Таким образом, для частиц одинакового диаметра гидравлическая крупность в соответствии с зависимостью Стокса может достаточно сильно различаться. Например, рассчитанное для частицы диаметром 0.001 мм и плотностью 2.65 г/см<sup>3</sup> значение гидравлической крупности составит 0.00000078 м/с. В то же время для частицы такого же диаметра, но плотностью 2.0 г/см<sup>3</sup> это значение будет равняться 0.00000047 м/с, а плотностью 3.5 г/см<sup>3</sup> – уже 0.00000118 м/с; т.е., строго говоря, для всего актуального диапазона плотностей, характерных для твердых частиц, присутствующих в водных объектах, существующие методы гранулометрического анализа взвешенных наносов и донных отложений, основанные на значении плотности 2.65 г/см<sup>3</sup> [5], недостаточно корректны (в частности, рекомендуемые в Наставлениях [8] сроки отборов проб частиц на пипеточной установке). Частицы диаметром 1 мкм и плотностью 2.65 г/см<sup>3</sup> при температуре 17.6–22.5°C за рекомендуемый срок отбора пробы 15 ч 35 мин опустятся на глубину 4.4 см, а плотностью 1.2 г/см<sup>3</sup> (т.е. поликарбонат или капрон) – только на 0.5 см. Таким образом, в столбе воды высотой 5 см, рекомендуемой для отбора пробы для определения содержания частиц <1 мкм [8], будет большое количество более крупных фрагментов, но с меньшей плотностью. Это зафиксировано при проведении контрольных экспериментов в ИНОЗ РАН с применением мембранных фильтров с диаметром пор 1 мкм. По всей видимости, данный вопрос потребует в ближайшее время дополнительного анализа и пересмотра.

Кроме того, процесс взмучивания и переноса частиц донных отложений в придонную зону водного объекта в значительной степени также зависит от их плотности. Этот показатель в явном виде входит в разработанные формулы для количественной оценки этого явления. В качестве примера можно привести уравнение Гончарова для так называемой срывающей скорости, т.е. “наименьшей скорости потока, при которой происходит беспрестанный срыв отдельных зерен на дне и при которой средний уровень пульсационных подъемных усилий примерно равен весу зерна в воде” [2]:

$$V_c = \lg(8.8h/d)[2g(\rho_s - \rho)d/1.75\rho]^{1/2},$$

где  $V_c$  – срывающая скорость,  $h$  – глубина.

Примечательно, что показатель  $(\rho_s - \rho)/\rho$  встречается в абсолютном большинстве аналогичных зависимостей [5, 7, 9]. Можно констатировать, что величина плотности твердых частиц на дне в значительной степени определяет интен-



**Рис. 1.** Картограмма территории расположения станций отборов проб донных отложений Ладожского озера. Крестики – точки отбора, буквы и цифры у крестиков – номера станций.

сивность взаимодействия придонных слоев воды и верхнего слоя донных отложений, что в конечном счете может сказываться даже на микроформах поверхности дна. Важно отметить, что интенсивность взаимодействия в этой зоне водного объекта в значительной степени может влиять на процессы вторичного загрязнения, что в конечном счете определяет его актуальное экологическое состояние.

В этой связи интересным представляется анализ изменения преобладающей плотности частиц наносов для конкретного водного объекта. В ИНОЗ РАН проведены подобные исследования применительно к донным отложениям Ладожского озера. В процессе этих работ были отобраны пробы с характерных участков дна.

На рис. 1 указаны станции отбора проб в ходе проведенных экспедиционных исследований.

Для всех отобранных проб выполнена оценка плотности частиц. Анализ проводился пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ [2]. В табл. 2 приведены результаты выполненных анализов.

Впервые получена картограмма распределения плотности донных отложений Ладожского озера, приведенная на рис. 2. Как видно из этой схемы, наибольшая плотность донных отложений данного водоема имеет место в зонах преобладания минеральной составляющей в общем составе наносов, т.е. в районах распространения песчаных грунтов, преимущественно в южной части. Для оценки доли органической части дон-

**Таблица 2.** Плотность частиц донных отложений на станциях отбора Ладожского озера

№ пункта	Номер станции	Гранулометрический состав (визуально)	Плотность частиц донных отложений, г/см <sup>3</sup>
1	P2	Ил	2.367
2	82	»	2.696
3	105	»	2.557
4	109	Глина	2.576
5	204	»	2.585
6	52	»	2.652
7	86	»	2.658
8	95	»	2.569
9	14	Супесь	2.782
10	С	Мелкий песок	2.743
11	76	»	2.703
12	36	Песок	2.705
13	25	»	2.773
14	38	»	2,644
15	G	»	2.771
16	62	»	2.687
17	17	Крупный песок	2.821
18	49	»	2.753

**Таблица 3.** Доля органической составляющей и плотность частиц донных отложений на станциях отбора Ладожского озера

Номер станции	Гранулометрический состав (визуально)	Плотность частиц донных отложений, г/см <sup>3</sup>	Доля органической составляющей (ППП), %
P2	Ил	2.37	19.7
105	Глина	2.56	10.5
109	»	2.58	10.2
204	»	2.58	10.4
52	»	2.65	8.6
86	»	2.66	11.6
62	»	2.69	1.2
36	»	2.70	0.6
76	Мелкий песок	2.70	0.6
С	»	2.74	0.5
49	Крупный песок	2.75	0.9
25	Песок	2.77	1
14	Супесь	2.78	3.7
17	Крупный песок	2.82	0.7

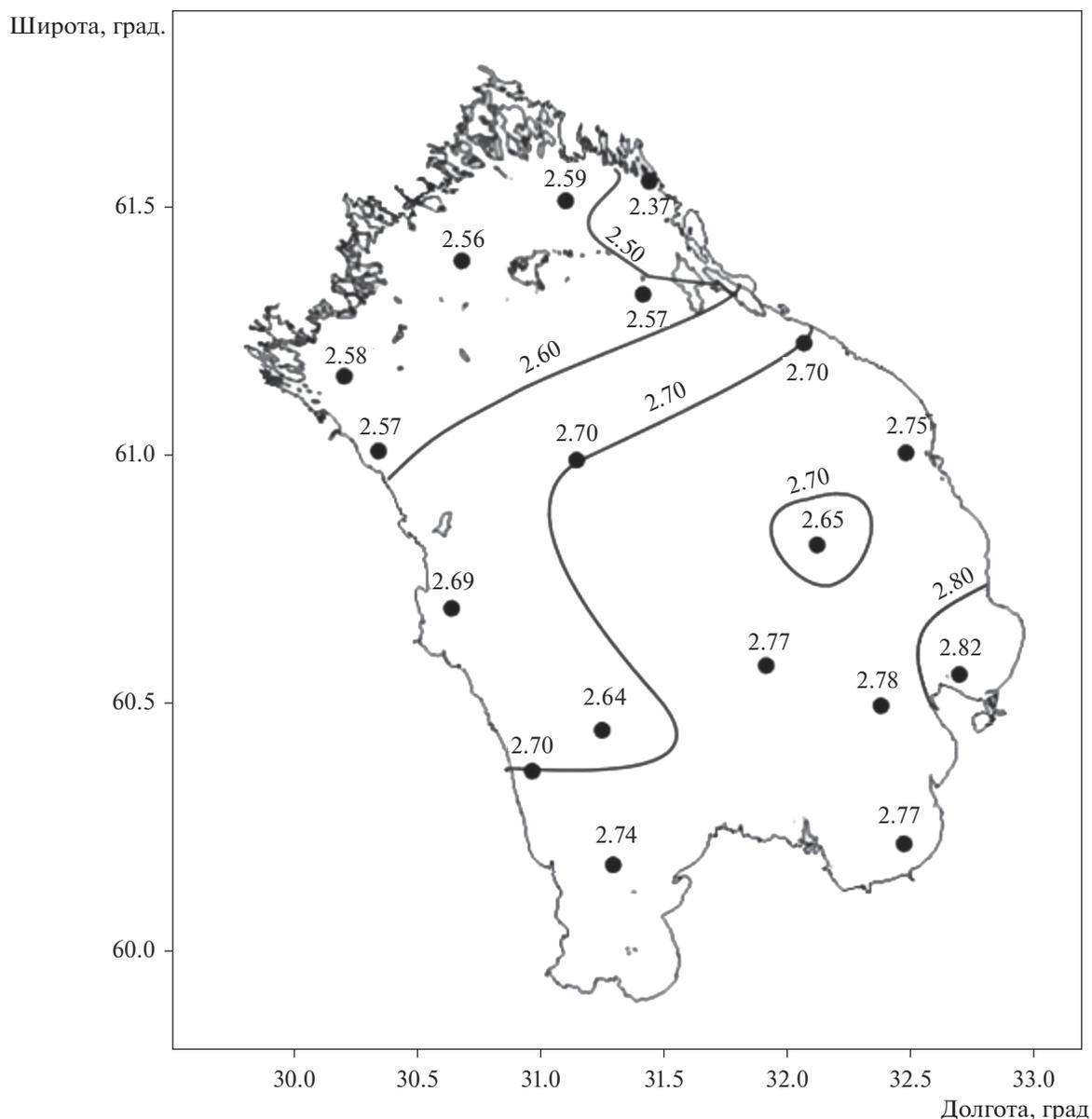
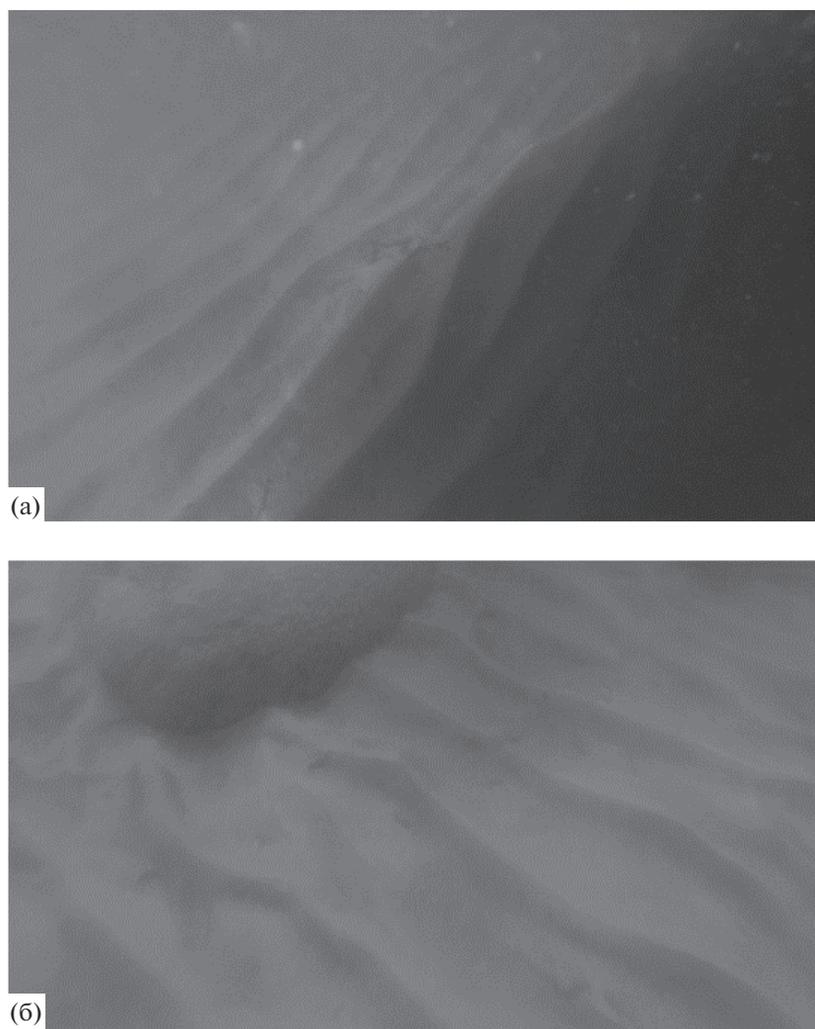


Рис. 2. Картограмма распределения плотности ( $\text{г/см}^3$ ) донных отложений Ладожского озера.

ных отложений для некоторых проб определены потери при прокаливании в муфельной печи. Результаты выполненных анализов и значения плотности частиц приведены в табл. 3.

В табл. 3 станции расположены в порядке увеличения измеренной плотности частиц. Из нее видно, что для северной глубоководной зоны характерны меньшие величины плотности и большие величины органической составляющей в пробах по сравнению с южными районами. В рамках данной работы выполнено визуальное сравнение фрагментов дна на характерных участках с различной плотностью частиц. Для этих це-

лей использованы фотографии соответствующих участков дна, полученные с использованием подводного аппарата "Лимноскоут", разработанного и изготовленного в ИНОЗ РАН. Данный аппарат позволяет выполнять фотографирование на максимальных глубинах, характерных для Ладожского озера [4]. Полученные фотографии в окрестностях станций 17 (плотность частиц донных отложений  $2.8 \text{ г/см}^3$ ) и 105 ( $2.56 \text{ г/см}^3$ ) приведены на рис. 3а, 3б, 4а, 4б соответственно. Как видно на фото, имеет место серьезное различие микроформ, образуемых частицами различной плотности и размеров в разных частях дна. Безусловно,

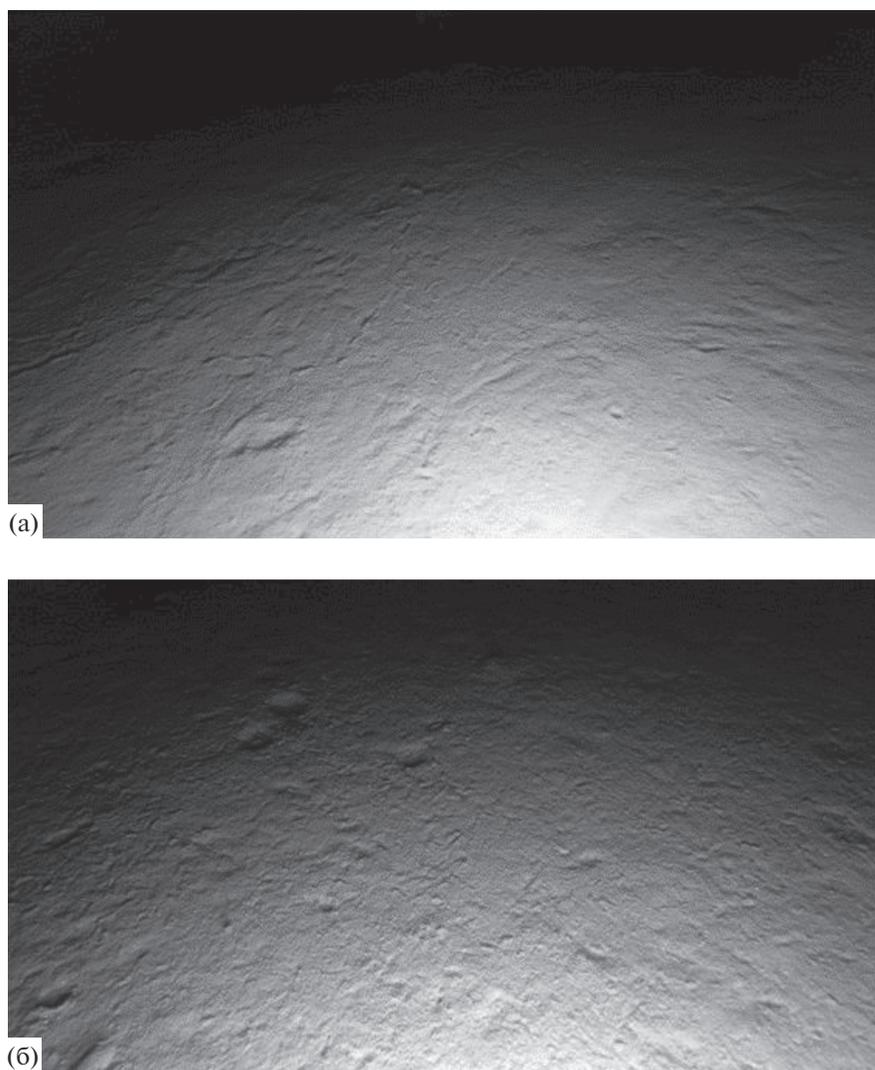


**Рис. 3.** Дно Ладожского озера в окрестностях ст. 17. Плотность частиц донных отложений –  $2.8 \text{ г/см}^3$ . (Фото М.О. Дудакова, сделанные подводным аппаратом “Лимноскоут”).

донный рельеф в обоих случаях сформирован в результате воздействия очень большого количества разных факторов. Тем не менее видно, что плотность частиц донных отложений оказывает влияние как на результирующие формы, так и на условия взаимодействия твердых частиц с водной массой в придонной зоне.

Полученные результаты демонстрируют зависимость плотности частиц донных отложений от соотношения органической и минеральной частей общего объема. При этом как органическая, так и минеральная части сами могут варьировать в очень широких пределах, что определяется большим количеством факторов. Все это создает весьма пеструю картину плотности частиц донных отложений, что необходимо учитывать при современном выявлении причинно-следствен-

ных связей между факторами того или иного экологического состояния водного объекта. Представленная на рис. 2 картосхема распределения плотности донных отложений уникальна не только для Ладожского озера, но и для крупных водных объектов вообще. В данном случае демонстрируется уменьшение плотности донных отложений от южных районов озера к северным. Безусловно, данная картосхема дает самое общее представление о распределении этого параметра на Ладоге. В дальнейшем, по-видимому, потребуются детализация измерений плотности в зависимости от конкретных задач и особенностей района исследований на озере. По существу, это требуется для любых крупных водных объектов при современных исследованиях взаимодействия донных отложений с водными массами, при



**Рис. 4.** Дно Ладожского озера в окрестностях ст. 105. Плотность частиц донных отложений –  $2.56 \text{ г/см}^3$ . (Фото М.О. Дудакова, сделанные подводным аппаратом “Лимноскаут”).

оценке внутренней нагрузки, моделировании изменения экологического состояния и решении других задач.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плотность частиц донных отложений водных объектов, зависящая от большого количества внешних и внутренних факторов, в современных исследованиях не может приниматься постоянной величиной для крупных озер и водохранилищ. Для корректного выявления причин того или иного экологического состояния водного объекта необходим учет вариабельности этого параметра и его влияния на протекающие процессы.

Существующие методики гранулометрического анализа частиц донных отложений естественных водных объектов требуют корректировки с учетом изменчивости величины плотности частиц.

Авторы приносят благодарность М.О. Дудакову (ИНОЗ РАН) за любезно предоставленные фотографии характерных участков дна Ладожского озера.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Великанов М.А.* Динамика русловых потоков. Т. 2. М.: Гос. изд-во техн.-теоретич. лит., 1955. 324 с.
2. *Гончаров В.Н.* Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1954. 452 с.

3. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартиформ, 2015.
4. Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Анохин В.И. Опыт применения глубоководного телеуправляемого аппарата для изучения подводных ландшафтов Ладожского озера // Рос. журн. прикладной экологии. 2018. № 4. С. 51–55.
5. Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 416 с.
6. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 272 с.
7. Леви И.И. Инженерная гидрология. М.: Высш. шк., 1968. 238 с.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам: Вып. 2. Ч. 2. Гидрологические наблюдения на постах. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 263 с.
9. Поздняков Ш.Р. Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах. СПб.: Лема, 2012. 227 с.
10. Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера. М.; Л.: Наука, 1966. 124 с.
11. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

УДК 532.5

## О ВЛИЯНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ НА ТОЛЩИНУ ВЕРХНЕГО ПЕРЕМЕШАННОГО СЛОЯ<sup>1</sup>

© 2021 г. Д. С. Гладских<sup>a, b, d, \*</sup>, В. М. Степаненко<sup>b, d</sup>, Е. В. Мортиков<sup>b, c, d</sup>

<sup>a</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия

<sup>b</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

<sup>c</sup>Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>d</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, 119234 Россия

\*e-mail: [daria.gladskikh@gmail.com](mailto:daria.gladskikh@gmail.com)

Поступила в редакцию 05.12.2019 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Проведено исследование влияния горизонтальных размеров внутренних водоемов (озер и водохранилищ) на протекающие в них процессы перемешивания. В качестве инструментов для проведения расчетов выбраны трехмерная гидростатическая модель и одномерная модель LAKE, основанная на осреднении трехмерных уравнений по горизонтальному сечению водоема. Для описания процессов вертикального обмена в обеих моделях использовалось  $k$ – $\epsilon$ -замыкание. В модели LAKE реализован учет гравитационных колебаний за счет параметризации градиента давления и горизонтальной вязкости. Проведена верификация моделей на примере численного эксперимента Като–Филлипса и серия численных экспериментов, демонстрирующих эффект горизонтального размера водного объекта на глубину перемешанного слоя. Подтверждена необходимость учета горизонтальных размеров водного объекта при моделировании вертикального распределения температуры в озерах и водохранилищах с размерами много меньше внутреннего радиуса деформации Россби.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, внутренние водоемы, турбулентность, сейши.

**DOI:** 10.31857/S0321059621020061

### ВВЕДЕНИЕ

Внутренние водоемы (озера и водохранилища) занимают 1.3–1.8% общей площади материков [16, 21], имеют большое значение в социально-экономическом развитии соответствующих регионов и являются объектом исследования во многих задачах гидрологии, экологии, метеорологии и климатологии. Термогидродинамические характеристики озер и водохранилищ оказывают существенное влияние на ряд процессов региональной циркуляции атмосферы. Помимо этого, изменения температуры в озерах и водохранилищах могут способствовать процессам эвтрофикации [3, 6, 7], т.е. повышению биологической продуктивности водных объектов, в частности в результате роста биомассы диатомовых и вредоносных сине-зеленых водорослей, что может приводить к массовому замору рыбы и ухудшению качества воды.

Также нельзя не отметить роль внутренних водоемов в изменении климата и реакции водных объектов на эти изменения [1, 13, 28]. В регионах с большим количеством озер и водохранилищ наблюдается выраженное потепление климата [12], в связи с этим отмечается более ранний период вскрытия льда и более короткая продолжительность ледостава. Для учета взаимодействия внутренних водоемов и атмосферы необходимо включать в климатические модели расчет термогидродинамических и биологических характеристик вод суши. Важно корректное воспроизведение термогидродинамики озер в мезомасштабных моделях атмосферы, где пространственное разрешение достигает нескольких километров, что меньше по сравнению с характерными горизонтальными размерами крупных внутренних водоемов.

Важный аспект при моделировании термогидродинамики внутренних водоемов – правильное описание процессов перемешивания, в том числе связанных с гравитационными (сейшевыми) колебаниями. Сейши возникают вследствие горизонтального перераспределения массы и дей-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 17-05-41117, 18-05-00292, 18-35-00602). Расчеты с применением трехмерной термогидродинамической модели выполнены при поддержке РФФИ (проект № 17-17-01210).

ствия градиента гидростатического давления и не принимаются во внимание в большинстве существующих одномерных (по вертикали) моделей. Однако при моделировании озер и водохранилищ с горизонтальными размерами, существенно меньшими, чем внутренний радиус деформации Россби  $L_R$ , сила Кориолиса становится пренебрежимо малой в сравнении с силой горизонтального градиента давления [10], а модели, не учитывающие сейши, не позволяют получить корректное описание поля скорости в подобных водоемах, что может приводить к заметной ошибке толщины перемешанного слоя (речь идет о завышении данного значения, особенно в период летней стратификации озер и водохранилищ [27]). Для умеренных широт  $L_R$  составляет 2–3 км, и следует ожидать, что сейши будут значимым образом влиять на процессы перемешивания в относительно небольших озерах, которые составляют большую часть внутренних водоемов суши [5].

Задача настоящего исследования — оценка влияния горизонтальных размеров водоема на процессы перемешивания в озерах и водохранилищах, в частности на толщину перемешанного слоя. Для упрощения анализа рассмотрены водоемы идеализированной формы и с постоянным по времени атмосферным воздействием.

#### МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ

К настоящему времени созданы математические модели различной пространственной размерности, позволяющие рассчитать распределение термогидродинамических величин во внутренних водоемах. Наиболее детальное описание дают трехмерные модели [4, 13, 18], основа которых — осредненная по Рейнольдсу система уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска и гидростатики [2]. Именно такая система рассматривается в настоящей работе для описания циркуляции термически стратифицированного внутреннего водоема. Пренебрежение эффектами коротковолновой радиации справедливо для небольших временных масштабов в теплое время года ночью и в холодное время, когда воздействие ветра на гидродинамику водоема практически отсутствует. Таким образом, постановка задачи в настоящей работе — относительно грубое приближение к условиям в природе, однако она позволяет в чистом виде выделить влияние горизонтальных размеров водного объекта на вертикальное распределение температуры, которое, очевидно, имеет место и в реальных объектах. В указанных условиях система уравнений принимает следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -A(u) + D_H(u, \lambda_m) + D_z(u, K_m + v) - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho dz' + f v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -A(v) + D_H(v, \lambda_m) + D_z(v, K_m + v) - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho dz' - f u, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -A(T) + D_H(T, \lambda_h) + D_z(T, K_h + \chi'), \quad (4)$$

$$\rho = \rho(T), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = w. \quad (6)$$

Здесь  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  — вектор скорости;  $\eta$  — отклонение свободной поверхности от равновесного состояния;  $T$  — температура;  $\rho$  — плотность;  $K_m(\lambda_m)$  и  $K_h(\lambda_h)$  — коэффициенты вертикальной (горизонтальной) турбулентной вязкости и температуропроводности соответственно;  $v, \chi'$  — коэффициенты молекулярной вязкости и температуропроводности;  $f$  — параметр Кориолиса (принимается постоянным);  $g$  — ускорение свободного падения;  $z$  — вертикальная координата, проходящая от дна водоема  $z = -H(x, y)$  до поверхности;  $t$  — время.

В системе уравнений (1)–(6)  $A(q)$  — оператор адвекции:

$$A(q) = \frac{\partial u q}{\partial x} + \frac{\partial v q}{\partial y} + \frac{\partial w q}{\partial z},$$

а  $D_H(q, \lambda)$  и  $D_z(q, K)$  — операторы горизонтальной и вертикальной диффузии с коэффициентами  $\lambda$  и  $K$  соответственно:

$$D_H(q, \lambda) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial q}{\partial y},$$

$$D_z(q, K) = \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial q}{\partial z}.$$

Для изучения гидрологических и термодинамических характеристик внутренних водоемов сезонных, годовых и климатических масштабов на сегодняшний день наиболее подходят одномерные модели, отличающиеся вычислительной простотой. Одномерную систему уравнений, описывающую вертикальное распределение импульса и тепла, можно получить осреднением приведенных выше трехмерных уравнений (1)–(6) по горизонтальному сечению водоема [11, 26]:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( A (K_h + \chi') \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = - \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( A (K_m + \nu) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) - \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \left( (K_m + \nu) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{\text{bot}} + \overline{D_H(u, \lambda_m)} + f \bar{v}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = - \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left( A (K_m + \nu) \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) - \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \left( (K_m + \nu) \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)_{\text{bot}} + \overline{D_H(v, \lambda_m)} - f \bar{u}. \quad (9)$$

Здесь  $A(z)$  – площадь горизонтального сечения водоема,  $p$  – гидростатическое давление, горизонтальная черта означает осреднение по  $A(z)$ . Здесь в соответствии со сказанным выше поток тепла на нижней границе положен равным 0, а поток импульса считается постоянным на границе каждого горизонтального сечения (величины, обозначенные индексом “bot”).

При записи систем уравнений (1)–(6) и (7)–(9) предположена также справедливость градиентного приближения для описания турбулентных потоков. Для задач настоящей работы представляется важным, чтобы вертикальное перемешивание в трехмерной и одномерной моделях представлялось схожим образом. Поэтому для расчета коэффициентов  $K_m$  и  $K_h$  в обеих моделях далее используется двухпараметрическое  $k$ – $\varepsilon$ –замыкание в стандартной формулировке [8, 20]. Оно основано на прогностических уравнениях для кинетической энергии турбулентности (ТКЭ,  $k$ ) и скорости ее диссипации  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_m}{\delta_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial z} + P + B - \varepsilon, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K_m}{\delta_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P - C_{2\varepsilon} \varepsilon + C_{3\varepsilon} B), \quad (11)$$

$$K_m = C_\varepsilon \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (12)$$

$$K_h = C_{\varepsilon T} \frac{k^2}{\varepsilon} = \frac{C_{\varepsilon T}}{C_\varepsilon} K_m. \quad (13)$$

Здесь слагаемое  $P$  соответствует генерации энергии турбулентности за счет сдвига скорости;  $B$  описывает генерацию или потребление энергии за счет действия сил плавучести;  $\delta_k, \delta_\varepsilon$  – турбулентные числа Шмидта для ТКЭ и скорости диссипации соответственно;  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  – эмпирические константы;  $C_\varepsilon$  и  $C_{\varepsilon T}$  – функции устойчивости для импульса и скалярных величин, полагаемые постоянными.

Система уравнений одномерной модели (7)–(13) не замкнутая, параметризации требуют первое, третье и четвертое слагаемые в правой части (8)–(9). Трехмерная и одномерная системы уравнений дополняются необходимыми граничными условиями.

### ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЯЗКОСТИ ДЛЯ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Представлен вывод параметризации горизонтального градиента давления и силы горизонтальной вязкости для двухмерного водоема без учета силы Кориолиса. Случай трехмерного водоема с учетом вращения Земли и без горизонтальной вязкости рассмотрен в [10]. Для учета сейш используется метод, основанный на явном воспроизведении первой горизонтальной моды. Пусть жидкость состоит из  $N$  слоев (рис. 1) постоянной плотности  $\rho_i$  ( $\rho_{i+1} > \rho_i$ ). Толщину каждого слоя  $h_i$  запишем в виде:  $h_i = H_i + h'_i$  ( $H_i$  – толщина  $i$ -го слоя в состоянии покоя жидкости,  $h'_i$  – отклонение толщины, причем  $|h'_i/H_i| \ll 1$ ,  $H$  – глубина водоема). Задача рассматривается для прямоугольника  $[-L_x/2, L_x/2] \times [0, H]$ . Решение этой задачи эквивалентно решению трехмерной задачи в области  $[-L_x/2, L_x/2] \times [-L_y/2, L_y/2] \times [0, H]$ , в которой поток импульса на поверхности направлен вдоль оси  $x$ , а компонента скорости по оси  $y$  равна 0.

Для каждого слоя можно записать следующие линеаризованные уравнения движения, неразрывности и гидростатики:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial p'_i}{\partial x} + \lambda_m \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial h'_i}{\partial t} + H_i \frac{\partial u_i}{\partial x} = 0, \quad (15)$$

$$p'_i = g \sum_{k=1}^N \rho_{\min(i,k)} h'_k, \quad i = \overline{1, N}. \quad (16)$$

Воспользовавшись тем обстоятельством, что во внутренних водоемах энергия мод с первым горизонтальным волновым числом, как правило, преобладает в спектре внутренних колебаний [19, 25], представим решение системы (14)–(16) в виде ряда Фурье до первой гармоники и осредним результат по горизонтальному сечению, которое в данном случае есть  $[-L_x/2, L_x/2]$ . В результате получим:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} = - \frac{\pi g}{2 L_x \rho_i} \sum_{k=1}^N \rho_{\min(i,k)} \Delta_x h'_k - \frac{\pi \nu \bar{u}_i}{L_x^2}, \quad (17)$$

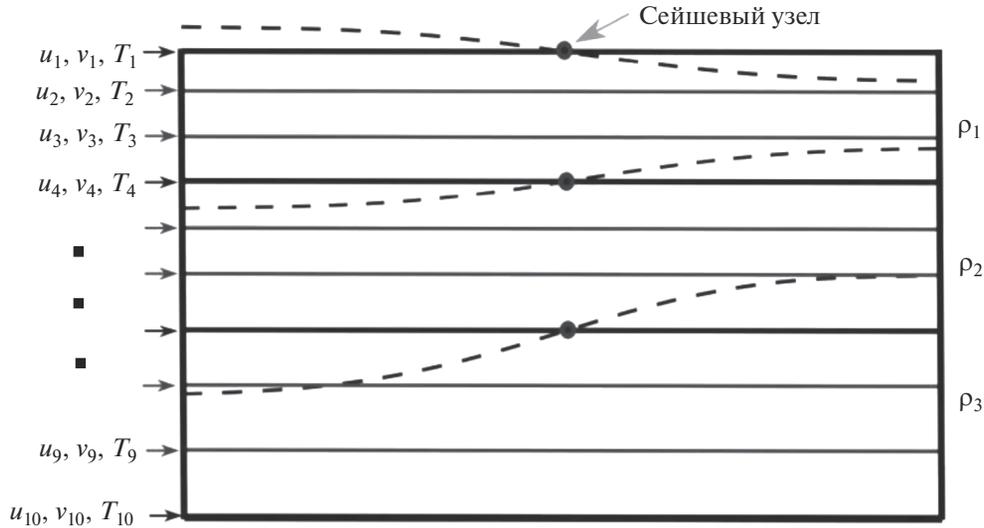


Рис. 1. Многослойное представление жидкости в параметризации сейш одномерной модели LAKE.

$$\frac{d\Delta_x \bar{h}'_i}{dt} = \frac{2\pi H_i}{L_x} \bar{u}_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (18)$$

$$\frac{d\Delta_x \hat{h}'_i}{dt} = \frac{2\pi H_i}{L_x} \hat{u}_i, \quad i = \overline{1, N},$$

$$\hat{u}_i = H_i^{-1} \int_{z_i}^{z_{i+1}} \bar{u} dz, \quad i = \overline{1, N}.$$

где введено обозначение  $\Delta_x \bar{h}'_i$  – разность величин  $\bar{h}'_i$ , осредненным по правой  $([0, L_x/2])$  и по левой  $([-L_x/2, 0])$  половинам сечения [17]. Данная система связывает осредненную по горизонтали компоненту скорости со средним градиентом давления. В системе (17)–(18) вертикальное распределение переменных является кусочно-постоянным, в отличие от системы (7)–(9), которая сформулирована относительно дифференцируемых по  $z$  функций. Используем уравнения (17)–(18) для замыкания системы (7)–(9); для этого в непрерывном по вертикали профиле плотности воды  $\rho = \rho[\bar{T}(z, t)]$  выделим  $N$  слоев с толщинами  $H_i = z_{i+1} - z_i$ , в каждом из которых плотность меняется по глубине незначительно. В каждом таком слое горизонтальный градиент давления можно рассчитать с помощью (17)–(18) с использованием в качестве  $\bar{u}_i$  осредненной по вертикали в пределах слоя горизонтальной скорости из одномерной модели  $\bar{u}(z, t)$ ; при этом этот градиент будет иметь постоянное значение внутри каждого полуинтервала  $[z_i, z_{i+1})$ . Дополненная таким образом система уравнений одномерной модели записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} (K_m + \nu) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \\ & = -\frac{\pi g}{2L_x \rho_i} \sum_{k=1}^N \rho_{\min(i,k)} \Delta_x \bar{h}'_k - \frac{\pi \nu u_i}{L_x^2}, \quad i: z \in [z_i, z_{i+1}), \end{aligned}$$

Полученную модель можно классифицировать как 1.5-мерную, так как в ней частично учитываются эффекты горизонтальной неоднородности заданной формы; с математической точки зрения здесь присутствуют элементы уравнений в частных производных, обыкновенных дифференциальных и интегральных уравнений. В дальнейшем изложенное замыкание одномерной системы будет называться также параметризацией сейш, так как оно позволяет явно воспроизводить сейши с горизонтальным волновым номером 1.

### ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В численных экспериментах использовалась одномерная модель LAKE (подробное описание – в [9]), дополненная параметризацией сейш. Модель развивается в МГУ им. М.В. Ломоносова и включена в последнюю версию модели деятельного слоя суши, развиваемой Институтом вычислительной математики (ИВМ) им. Г.И. Марчука РАН [2] и МГУ. Для верификации одномерной модели использовалась трехмерная гидростатическая модель, разрабатываемая в НИВЦ МГУ и ИВМ РАН на основе единого гидродинамического кода, объединяющего подходы DNS (Direct Numerical Simulation), LES (Large-Eddy Simulation) и RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) для расчета геофизических турбулентных тече-

ний [22, 23]. Численный метод решения системы уравнений (1)–(6) основан на консервативных конечно-разностных методах дискретизации на прямоугольных сетках и использовании полунейного метода для аппроксимации по времени, в котором адвективный перенос и горизонтальная диффузия описываются явными схемами.

Значения эмпирических констант в  $k$ - $\epsilon$  замыкании одномерной и трехмерной моделей согласованы с приведенными в статье [27], их выбор обосновывается, например, в работах [14, 15]. Отметим, что турбулентное число Прандтля принято константой  $Pr_t = K_m/K_h = 1.25$ , а константа  $C_{3\epsilon}$ , определяющая изменение скорости диссипации под действием сил плавучести, полагалась равной 1.14 при  $B > 0$  и  $-0.4$  при  $B < 0$ .

С применением одномерной и трехмерной моделей проведены следующие эксперименты: верификация на основе численной реализации классического лабораторного эксперимента Като–Филлипса [17], результаты которого служат основным материалом для калибровки турбулентных замыканий для сдвиговых течений в стратифицированной жидкости, и расчеты с идеализированными водоемами прямоугольного вертикального сечения при различных горизонтальных размерах (10 и 1000 м).

В эксперименте Като–Филлипса рассматривается однородная по горизонтали стратифицированная жидкость, а вертикальные границы отсутствуют. Начальный профиль температуры линейный, а единственным источником турбулентности считается ветер, обеспечивающий постоянный поток импульса на поверхности. В классической постановке, описанной в [17], рассматривался кольцевой резервуар, на поверхности которого создавалось напряжение трения в направлении по окружности. Внутренний и внешний диаметры составляли 152.4 и 106.7 см соответственно; таким образом, ширина канала была равна 22.8 см. Глубина резервуара составляла 28 см.

Результаты данного эксперимента хорошо описывает теоретическая формула изменения толщины перемешанного слоя во времени [24]:

$$h_{ML}(t) = \frac{Cu^*\sqrt{t}}{\sqrt{N(t=0)}} \quad (C \sim 1.05), \quad (19)$$

где  $h_{ML}$  – толщина перемешанного слоя,  $u^*$  – скорость трения на поверхности ( $u^* = \sqrt{\tau/\rho_0}$ ).

Для численной реализации эксперимента Като–Филлипса приведенные выше уравнения одномерной и трехмерной моделей дополнены следующими граничными условиями на дне:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0,$$

$$w = 0,$$

на поверхности:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0,$$

$$-\rho(K_m + \nu)\frac{\partial u}{\partial z} = \tau.$$

В трехмерной модели задавались условия периодичности по горизонтальным координатам.

Для серии экспериментов с наличием вертикальных стенок трехмерная модель была дополнена боковыми граничными условиями:

$$\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=-L_x/2, L_x/2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=-L_y/2, L_y/2} = 0,$$

$$u\Big|_{x=-L_x/2, L_x/2} = 0, \quad v\Big|_{y=-L_y/2, L_y/2} = 0,$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x}\Big|_{x=-L_x/2, L_x/2} = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial y}\Big|_{y=-L_y/2, L_y/2} = 0.$$

Примечательно, что в одномерной модели боковые граничные условия не задаются, но первая горизонтальная мода полей скорости и давления, для которой получена параметризация сейш, удовлетворяет условиям выше.

Во всех экспериментах заданы следующие параметры:

глубина водоема – 10 м;

время расчета – 7 либо 30 дней;

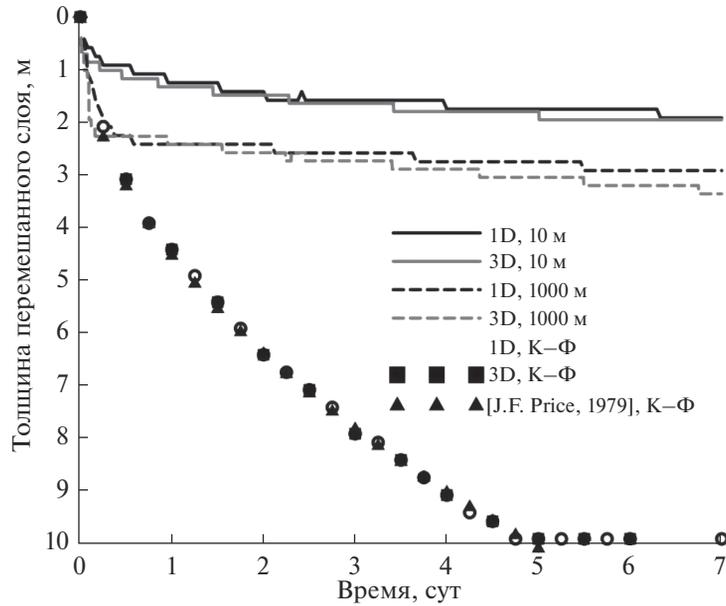
начальный градиент температуры –  $\partial T/\partial z = 1.5^\circ\text{C}/\text{м}$ , что соответствует частоте Брента–Вайсяля (частоте плавучести) –  $N = 4 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ;

поток импульса на поверхности –  $\tau = 10^{-2} \text{ Н}/\text{м}^2$ , сила Кориолиса не учитывается.

При изложенных выше граничных условиях, параметрах эксперимента и выборе однородных по  $y$  начальных условий трехмерная задача становится двухмерной, что соответствует предположениям, используемым выше в одномерной модели.

## ДИНАМИКА ТОЛЩИНЫ ПЕРЕМЕШАННОГО СЛОЯ

Обе модели в рамках численной реализации классического эксперимента Като–Филлипса продемонстрировали хорошее согласие с аналитическим решением. Что касается экспериментов с водоемами конечного размера, то продемонстрировано, что с увеличением продольного раз-



**Рис. 2.** Изменение толщины перемешанного слоя со временем при расчетах конечных водоемов и в классическом эксперименте Като–Филлипса.

мера водоема толщина перемешанного слоя также возрастает (рис. 2).

Важно отметить, что, насколько известно авторам, лабораторного эксперимента для подобных условий не проводилось, и эмпирическая оценка, аналогичная (19), отсутствует; поэтому в качестве “эталонного” результата в данном случае авторы полагают возможным считать результат, полученный трехмерной гидростатической моделью. Одномерная модель демонстрирует хорошее согласие с трехмерной: параметризация горизонтального градиента давления и вязкости позволяет реалистично воспроизвести толщину перемешанного слоя. Глубина перемешанного слоя  $h_{ML}$  существенно зависит от горизонтальных размеров водоема, и чем больше водоем, тем ближе она становится к результату классического эксперимента Като–Филлипса, где вертикальные стенки отсутствуют. Ограничение  $h_{ML}$  при наличии вертикальных стенок объясняется тем, что в водоеме в этом случае возникает градиент гидростатического давления, действующий противоположно потоку импульса из атмосферы. Это приводит к установлению квазистационарной циркуляции в перемешанном слое. В бесконечном по горизонтали слое воды (эксперимент Като–Филлипса) горизонтальный градиент давления не возникает, поток импульса из атмосферы приводит к монотонному и неограниченному увеличению максимальной скорости в перемешанном слое, что, в свою очередь, способствует быстрому росту  $h_{ML}$ .

## ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ

В численных экспериментах для прямоугольных водоемов с различными горизонтальными размерами проведен также анализ вертикального распределения температуры, скорости течения и коэффициента турбулентной вязкости. Продолжительность численных экспериментов составила 30 дней, остальные параметры расчетов описаны выше. Сравнения между одномерной и трехмерными моделями проводились на 7-й и 30-й дни расчетов.

Сопоставлены профили вертикального распределения температуры (рис. 3).

Продemonстрировано хорошее согласие между моделями на временных масштабах в несколько дней. Различия между результатами, полученными с помощью рассмотренных в работе моделей, для больших временных интервалов ( $\geq 30$  дней) для водоема длиной 1000 м могут быть связаны с особенностями моделей: напомним, что одномерная модель построена на осреднении трехмерных уравнений, а параметризация градиента давления учитывает сейши только первой горизонтальной моды. Примечательно при этом, что для водоема длиной 10 м на 30-й день две модели дают практически идентичные профили температуры.

Это позволяет предположить, что в трехмерной модели доля кинетической энергии гармоник с волновым номером  $>1$  в общей кинетической энергии больше для водоема длиной 1000 м, чем для водоема длиной 10 м.

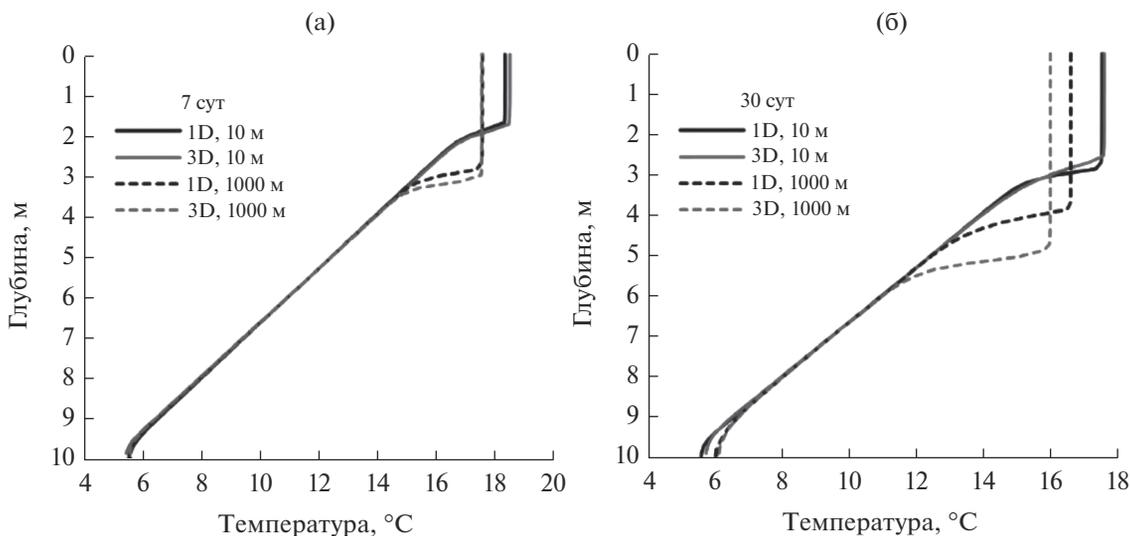


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры на 7-й (а), на 30-й (б) дни расчета по одномерной и трехмерной моделям.

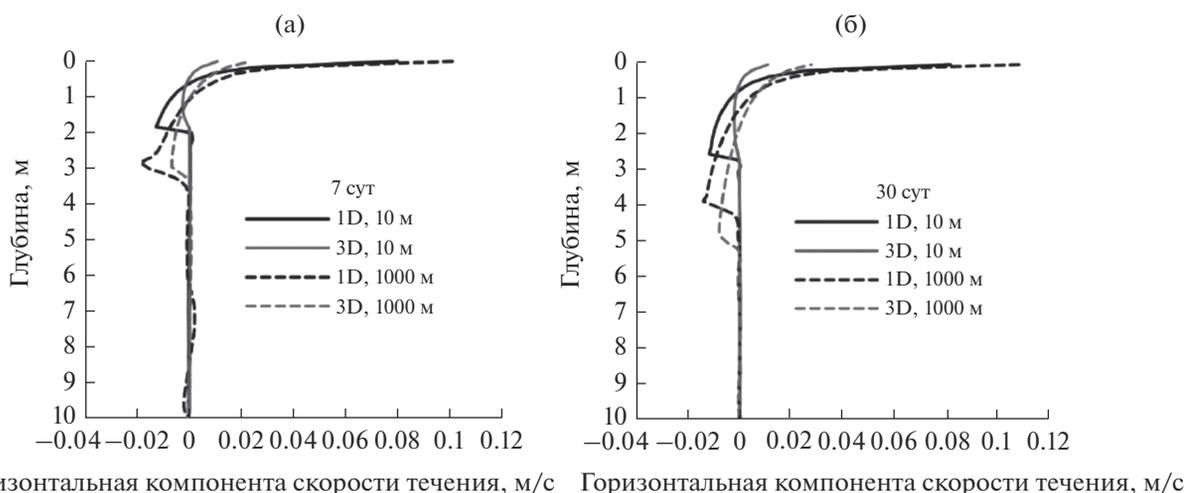


Рис. 4. Вертикальное распределение горизонтальной скорости на 7-й (а), на 30-й (б) дни расчета.

Таким образом, первая горизонтальная мода, параметризованная в одномерной модели, хуже описывает поле скорости для водоема длиной 1000 м, чем для водоема длиной 10 м, что приводит к менее точному воспроизведению вертикального турбулентного обмена и скорости заглубления перемешанного слоя.

Отметим, что результаты обсуждаемых численных экспериментов для временного масштаба за пределами 7–10 дней представляют сугубо теоретический интерес. Дело в том, что в постановке эксперимента поток импульса из атмосферы, определяемый ветром, имеет постоянные скорость и направление в течение всего времени расчета. В природе подобной ситуации не бывает.

Во-первых, статистически значим суточный ход ветра: как правило, ветер сильнее днем и слабее ночью. Во-вторых, изменения ветра синоптического временного масштаба связаны с прохождением циклонов и антициклонов, время жизни которых составляет, как правило, 7–10 дней; так что для небольших временных масштабов (не более нескольких дней) в крайне редких случаях возможна ветровая обстановка, подобная заданной в эксперименте.

Помимо распределения температуры воды, проанализировано также вертикальное распределение скорости течения (рис. 4).

В профилях скорости течений в нижней части перемешанного слоя наблюдаются противопо-

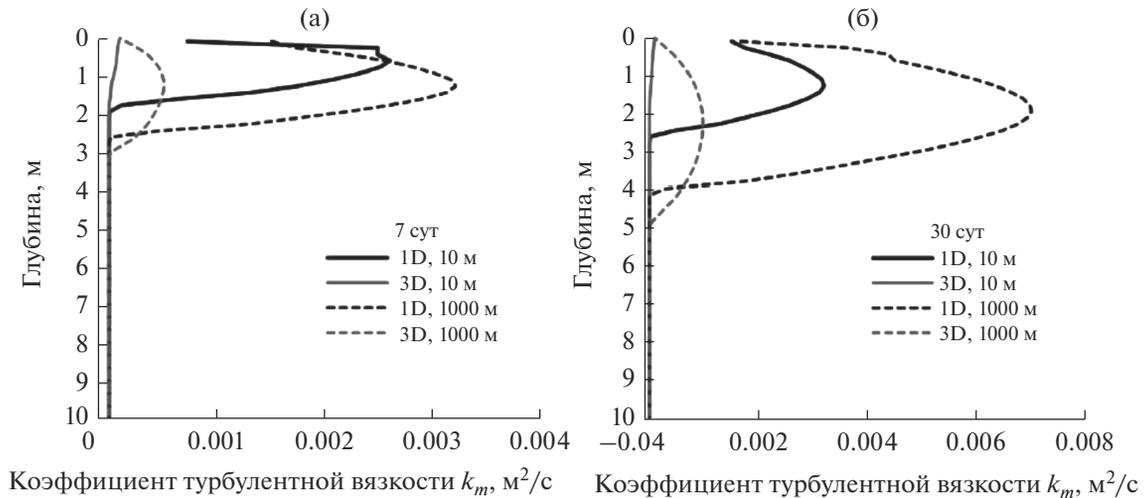


Рис. 5. Вертикальное распределение коэффициента турбулентной вязкости на 7-й (а), на 30-й (б) день расчета.

ложные направления градиента давления и скорости ветра, а сама структура течения квазистационарная. В термоклине наблюдаются гравитационные колебания, амплитуда которых подавляется горизонтальной вязкостью.

Профили коэффициента турбулентной вязкости (рис. 5) показывают, что ее значения в перемешанном слое в одномерной модели намного больше, чем в трехмерной. Это можно объяснить следующим механизмом: в обеих моделях трение между противоположно направленными верхним и нижним течениями существует вследствие вертикальной турбулентной вязкости, но в трехмерной модели воспроизводятся также вертикальные “ветви” циркуляционной ячейки, роль которых заключается в переносе импульса между верхней и нижней границами перемешанного слоя. Это способствует уменьшению разности скорости течений в трехмерной модели, так что в одномерной модели сдвиг скорости оказывается сильнее. В соответствии с формулой (10) в одномерной модели больше оказывается и генерация турбулентной кинетической энергии, что и приводит к завышению коэффициента турбулентной вязкости. В связи с этим при описании, например, турбулентного переноса фитопланктона и парниковых газов по вертикали в перемешанном слое результаты одномерной модели могут содержать заметные ошибки, и этот аспект требует дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам настоящего исследования можно заключить, что горизонтальные размеры водоемов оказывают существенное влияние на глубину верхнего перемешанного слоя и с увеличением размера водоема увеличивается скорость

заглубления термоклина. Подтверждена необходимость учета сейшевых колебаний для корректного описания динамики перемешивания в водоемах с горизонтальными размерами намного меньшими, чем радиус деформации Россби. Предложенная В.М. Степаненко параметризация градиента давления и горизонтальной вязкости для одномерной модели LAKE позволяет с достаточной точностью воспроизводить толщину перемешанного слоя. При этом важно отметить, что одномерная модель завышает значения скорости течений, а в связи с этим — и значения коэффициента турбулентной вязкости. Авторы планируют исследовать, насколько данный факт будет влиять на корректность расчетов при моделировании, в частности, процессов переноса фитопланктона и парниковых газов в реальных водных объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А. Математическое моделирование крупных стратифицированных озер. СПб.: Наука, 2003. С. 320.
2. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Модель земной системы INMCM4: воспроизведение и прогноз климатических изменений в 19–21 веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 379–390.
3. Горбунов М.Ю. Вертикальное распределение бактериохлофиллов в гумозных озерах Волжско-Камского заповедника (Республика Татарстан) // Поволжский экол. журн. 2011. № 3. С. 280–293.
4. Дианский Н.А., Фомин В.В., Выручалкина Т.Ю., Гусев А.В. Воспроизведение циркуляции Каспийского моря с расчетом атмосферного воздействия с

- помощью модели WRF // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2016. № 5. С. 21–34.
5. Иванов П.В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Бюл. ЛГУ. 1948. № 21. С. 29–36.
  6. Козицкая В.Н. Влияние экологических факторов (освещение, температура) на рост водорослей // Гидробиол. журн. 1989. № 6. С. 55–70.
  7. Крейман К.Д., Голосов С.Д., Сквородов Е.П. Влияние турбулентного перемешивания на фитопланктон // Вод. ресурсы. 1992. № 3. С. 92–97.
  8. Лыкосов В.Н. О проблеме замыкания моделей турбулентного пограничного слоя с помощью уравнений для кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1992. № 28. С. 696–704.
  9. Степаненко В.М. Математическое моделирование теплового режима и динамики парниковых газов в водоемах суши. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2018. 361 с.
  10. Степаненко В.М. Параметризация сейш для одномерной модели водоема // Тр. МФТИ. 2018. Т. 10. № 1. С. 97–111.
  11. Степаненко В.М. Численное моделирование взаимодействия атмосферы с водоемами суши. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2007. 159 с.
  12. Эдельштейн К.К. Структурная гидрология суши. М.: Геос, 2005. 316 с.
  13. Abbasi A., Annor F.O., Giesen N.V. Investigation of temperature dynamics in small and shallow reservoirs, case study: Lake Binaba, Upper East Region of Ghana // Water. 2016. V. 8. № 3. P. 84.
  14. Burchard H. Applied turbulence modelling in marine waters. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. 218 p.
  15. Burchard H., Bolding K. Comparative analysis of four second-moment turbulence closure models for the oceanic mixed layer // J. Phys. Oceanogr. 2001. V. 31. P. 1943–1968.
  16. Downing J.A., Prairie Y.T., Cole J., Duarte C.M. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // Limnol. Oceanogr. 2006. V. 51. № 5. P. 2388–2397.
  17. Kato H., Phillips O.M. On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid // J. Fluid Mech. 1969. V. 37. № 4. P. 643.
  18. Kelley J.G.W., Hobgood J.S.K., Bedford W., Schwab D.J. Generation of three-dimensional lake model forecasts for lake Erie // Wea. Forecast. 1998. № 13. P. 659–687.
  19. Marchenko A.V., Morozov E.G. Seiche oscillations in Lake Valunden (Spitsbergen) // Russ. J. Earth. Sci. 2016. V. 16. № 2. P. 22.
  20. Mellor C. L., Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers // J. Atmos. Sci. 1974. № 31. P. 1791–1806.
  21. Messenger M.L., Lehner B., Grill G., Nedeva I., Schmitt O. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach // Nat. Commun. 2016. № 7. P. 13603.
  22. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // Russian J. Numerical Analysis and Math. Modelling. 2019. V. 34. № 2. P. 1–14.
  23. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2016. V. 52. № 1. P. 108–115.
  24. Price J.F. On the scaling of stress-driven entrainment experiments // J. Fluid Mechanics. 1979. V. 90. № 4. P. 509.
  25. Roget E., Khimchenko E., Forcat F., Zavialov P. The internal seiche field in the changing South Aral Sea (2006–2013) // Hydrol. Earth System Sci. 2017. V. 21. № 2. P. 1093–1105.
  26. Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A., Miettinen H., Lykosov V., Vesala T. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 1977–2006.
  27. Stepanenko V., Klaus D., Jöhnk K.D., Machulskaya E., Perroud M., Subin Z., Nordbo A., Mammarella I., Mironov D. Simulation of surface energy fluxes and stratification of a small boreal lake by a set of one-dimensional models // Tellus. Ser. A. Dynamic Meteorol. Oceanography. 2014. V. 66. P. 21389.
  28. Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnol. Oceanography. 2009. № 54. P. 2298–2314.

## ЦВЕТЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩА МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА<sup>1</sup>

© 2021 г. К. К. Эдельштейн<sup>а</sup>, Ю. С. Даценко<sup>а, б, \*</sup>, В. В. Пуклаков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: yuri0548@mail.ru

Поступила в редакцию 11.11.2019 г.

После доработки 18.08.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

На основе многолетних наблюдений и модельных расчетов рассмотрены факторы развития фитопланктона в стратифицированном Можайском водохранилище. Для анализа изменчивости величин биомассы фитопланктона использован индекс погодной контрастности, основанный на выделении синоптических циклов температуры водной поверхности. Сравнительная оценка интенсивности цветения в разные годы проведена на основе индекса цветения воды, рассчитанного как сумма ежесуточных величин биомассы фитопланктона, полученных по модельному расчету. Проанализированы особенности развития диатомовых водорослей и цианобактерий в водохранилище в зависимости от гидрометеорологических условий и многолетние изменения индексов цветения воды и погодной контрастности.

**Ключевые слова:** водохранилище, фитопланктон, цветение воды, моделирование, индекс погодной контрастности, индекс цветения воды.

**DOI:** 10.31857/S0321059621020048

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе под цветением водохранилища авторы понимают явление интенсивного развития в нем фитопланктона, при котором биомасса водорослей в поверхностном трофогенном слое достигает величины  $\geq 1$  г/м<sup>3</sup>. В этом случае на водопроводных станциях питьевого и промышленного водоснабжения возникает необходимость интенсификации очистки воды [10]. Исследование фитопланктона на Можайском водохранилище, головном водоеме в Москворецкой системе источников водоснабжения столицы, началось в первый год заполнения его ложа водой Верхней Москвы-реки [1]. Площадь водоема 31 км<sup>2</sup>, объем 0.235 км<sup>3</sup>, длина 28 км, максимальная глубина 22 м. В межень средняя скорость стокового течения составляет несколько сантиметров в секунду [19]. Поэтому ежегодно водохранилище термически и гидрохимически стратифицировано в вегетационный сезон, что типично для слабопроточных водохранилищ.

С 1965 г. регулярные альгологические наблюдения проводятся на 5–10 вертикалях в верхнем, среднем и приплотинном участках водохранилища [12–15, 17, 21]. В России столь продолжительные наблюдения за цветением воды ведутся лишь на двух водохранилищах – Можайском и Рыбинском.

На основе имеющейся базы данных по гидрохимическим и альгологическим показателям разработана математическая модель гидроэкологического режима водохранилища.

На первом этапе ее разработки определялся генетический состав воды в расчетных отсеках. В них в результате смешения речных и водохранилищных вод создавались водные массы, положение которых в водоеме менялось в течение года, что и было представлено в виде одномерной многосекционной воднобалансовой модели СВМ (Состав Водных Масс) [7, 8, 32]. Затем эта модель была трансформирована в двухмерную в вертикальной плоскости боксовую модель термогидродинамических процессов в водохранилище – модель ТМО (тепло- и массообмен) [18], которая модернизирована в многосекционную боксовую гидрологическую модель водохранилища с экологическим блоком – модель ГМВ-МГУ, описание алгоритма и результатов верификации кото-

<sup>1</sup> Расчеты многолетних колебаний гидроэкологических характеристик выполнены по плану НИР кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ (ГЗ АААА-А16-116032810054-3), статистический анализ выполнен при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-01066).

рой опубликованы в [2]. В экологическом блоке этой модели рассчитываются ежедневные гидрологические характеристики, гидрохимические показатели воды и биомасса водорослей разных отделов в метровых боксах 18 секций (отсеков), на которые разделяется вся толща воды Можайского водохранилища.

И по натурным данным, и по модельному расчету в Можайском водохранилище четко выделяются ежегодный весенний пик цветения преимущественно диатомовыми водорослями, следующая за ним фаза “чистой воды” и продолжительный период летне-осеннего интенсивного развития цианобактерий, что характерно для большинства водохранилищ России [26]. В отдельные годы летне-осеннее цветение в водохранилищах Московско-реальной системы было настолько интенсивным, что приводило к необходимости переключать подачу воды в Москву с особенно сильно зацветшего водохранилища на водохранилища с наименьшим цветением [24].

Годовые величины рассчитанной по модели суммарной биомассы планктонных водорослей в водохранилище определяются биомассой цианобактерий (коэффициент корреляции между ними  $r = 0.96$ ,  $n = 55$  лет,  $p = 0.95$ ) [6]. Поэтому в данной работе предпринята попытка установить причину вариации интенсивности цветения воды в Можайском водохранилище цианобактериями в течение почти 60-летнего его существования (1961–2018 гг.) в зависимости от изменчивости погодных условий. Для этого использованы результаты полевых исследований и модельных расчетов по ГМВ-МГУ ежесуточных величин биомассы цианобактерий и температуры воды верхнего трофогенного слоя центрального плеса Можайского водохранилища.

#### МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИНДЕКСА КонтРАСТНОСТИ ПОГОДЫ И ИНДЕКСА ЦВЕТЕНИЯ ВОДЫ

В безледный период на водоемах умеренных широт ежегодно из-за изменчивости погоды наблюдается чередование повышений температуры водной поверхности и ее понижений. Это вызывается совокупным воздействием меняющихся величин поступающей солнечной радиации, облачности, ветра, температуры и влажности воздуха. Два 70-суточных периода автоматизированных гидрометеорологических наблюдений в центре Можайского водохранилища (с 26.06.2016 по 3.09.2016 и в те же даты 2017 г.) разделены на фазы нагревания и охлаждения поверхности воды, каждая пара которых образует погодный цикл гидроэкологического режима водоема. За фазы погодных циклов авторами принят период времени изо дня в день повышающейся или понижающейся температуры поверхностного метрового

слоя воды на  $\geq 3^\circ\text{C}$  в течение  $\geq 3$  сут [4]. Это позволяет при оценке длительности фазы не учитывать пространственную неоднородность поля температуры (по многолетним наблюдениям, в пределах плеса температура  $\leq 3^\circ\text{C}$ ) и пренебречь ее внутрисуточной изменчивостью при неизменной погоде. По данным регистрации температуры в 2016 г. выделено 4 погодных цикла (8 фаз), а в 2017 г. — только 2 (4 фазы). В эти же периоды впервые были проведены автоматизированные наблюдения за интенсивностью фотосинтеза фитопланктона с использованием продукцимера [3]. Регистрация содержания кислорода и температуры воды двумя оксиметрами продукцимера с дискретностью 15 мин в темном и светлом сосудах, вода в которых автоматически обновлялась через каждые 3 ч, велась в течение 70 сут на горизонте 0.5 м над затопленным руслом р. Москвы (глубина 12 м). Одновременно судовой метеостанцией непрерывно регистрировались метеохарактеристики на высоте 2 м над водной поверхностью и термокосой — температура воды на шести горизонтах этой вертикали. Интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) регистрировалась ФАР-логгером на высоте 10 м над берегом. Наиболее показательна изменчивость метеохарактеристик проявлялась в повышении и понижении температуры воды поверхностного слоя. Вся совокупность выше перечисленных метеохарактеристик определяет тепловой баланс этого слоя и, следовательно, изменение температуры воды с изменением любой из этих характеристик, поэтому именно эта температура использовалась для расчета предложенного индекса погодной контрастности (ИПК) [29]:

$$\text{ИПК} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta T|^i}{[(T_{\max \text{ рп}} - T_{\text{in рп}}) + (T_{\max \text{ рп}} - T_{f \text{ рп}})]}, \quad (1)$$

$i$  — номер фазы,  $n$  — число температурных фаз,  $\Delta T$  — диапазон изменения температуры фазы,  $T_{\max \text{ рп}}$  — максимальная температура воды расчетного периода,  $T_{\text{in рп}}$  и  $T_{f \text{ рп}}$  — температура в начале и конце расчетного периода соответственно.

Чем сильнее изменчивость температуры фазы и чем фаз больше в течение расчетного периода, тем контрастнее выражены чередования погодных циклов, что и характеризуется величиной ИПК.

Расчет ИПК для 70-суточных периодов 2016 и 2017 гг. показал, что в 2016 г. ИПК был в 2.2 раза больше, чем в 2017 г. При этом максимальные часовые величины валовой первичной продукции в 2016 г. оказались в 1.6 раза выше, а среднесуточные за фазу — в 1.8 раз выше, чем в 2017 г. Сравнение средних величин продукции за расчетные периоды этих лет показало, что в 2016 г. она была в 1.5 раза выше, чем в 2017 г. [29]. Такое соотношение ИПК и средней за период валовой первичной

продукции свидетельствует о влиянии изменчивости погоды на продуктивность водохранилища. В оба года максимальные величины валовой первичной продукции получены в такие теплые фазы, которым предшествовало наибольшее охлаждение водной толщи плеса.

Различие погодных фаз гидроэкологического режима водохранилища проявляется в том, что в фазы охлаждения и нагревания внутренний водообмен плеса существенно различен. В фазы охлаждения воды в холодную, ветреную и пасмурную погоду возникают вихри Ленгмюра. Эта вихреобразная циркуляция перемешивает водную толщу до большой глубины и может достигать дна. Это перемешивание приводит к выносу в трофогенный слой большого количества бескислородных, но насыщенных продуктами деструкции детрита и органики в илах глубинных вод. В фазы нагревания при штилевой и безоблачной погоде в темное время суток эпилимнион перемешивается ячеистой конвекцией при охлаждении воды вплоть до восхода солнца. В это время в нем образуются цилиндрические ячейки Бенара. По их периферии в охлаждающемся поверхностном слое вода опускается до термоклина в слое температурного скачка, а в центре ячеек возникает восходящий ток воды к водной поверхности. Возникает так называемый малый биогидрохимический круговорот [27]. С восходящими токами из нижних слоев эпилимниона к поверхности выносятся растворенный диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) и биогенные вещества, в том числе фосфор. В первую же половину светлого времени суток биогенные вещества поглощаются водорослями в процессе фотосинтеза.

Автоматизированные наблюдения показали, что одним из факторов межгодовой изменчивости продукции цианобактерий в летне-осенний сезон разных лет могут быть частота и контрастность изменчивости погоды в сезон цветения. По данным многолетних наблюдений за температурным режимом водохранилища (1961–2001 гг.), число погодных циклов в среднем за вегетационный сезон составляло 6 и варьировало от 3 до 9 в отдельные годы [4].

Чтобы проверить реальность гипотезы о влиянии контрастности погоды на интенсивность цветения воды в водохранилище, по модели ГМВ-МГУ выполнен расчет ежедневных величин биомассы цианобактерий и диатомовых водорослей для 58 лет существования водохранилища. Примеры модельного воспроизведения режима цветения водорослей в приплотинном плесе Можайского водохранилища в годы, близкие к средним по притоку воды летом при жаркой либо прохладной погоде, приведены на рис. 1. По результатам расчетов для каждого года был выделен сезон цветения цианобактерий, который начи-

нался с момента достижения их биомассы 1 мг/л ранним летом и заканчивался при уменьшении этой величины до 1 мг/л осенью. Для сравнительной оценки интенсивности цветения в разные годы предложен индекс цветения воды (ИЦВ), равный сумме ежедневных величин биомассы фитопланктона за весь период их цветения [25]:

$$\text{ИЦВ} = \sum_{\tau_1}^{\tau_2} B_{\text{phyt}}^i (\text{г м}^{-3}), \quad (2)$$

$\tau_1$  – первые сутки цветения,  $\tau_2$  – последние сутки цветения,  $B_{\text{phyt}}$  – биомасса фитопланктона.

Расчетный период (РП) для оценки изменчивости погоды по полученным в гидродинамическом блоке той же модели среднесуточным значениям температуры воды на горизонте 1 м начинался с момента достижения температуры поверхностного слоя воды  $15^\circ\text{C}$ , после которой в водоеме, как правило, формируется устойчивый слой температурного скачка. Заканчивался этот период, когда среднесуточная температура поверхностного слоя снижалась до  $10^\circ\text{C}$ . Весь этот период подразделялся на фазы нагревания и фазы охлаждения воды так же, как это было сделано ранее для расчета ИПК за 70-суточные периоды 2016 и 2017 гг. Для всех лет существования водохранилища для каждого расчетного периода получен интегральный индекс погодной контрастности (ИИПК):

$$\text{ИИПК} = \frac{\sum_1^n |\Delta T|^i}{[(T_{\text{max рп}} - 15) + (T_{\text{max рп}} - 10)]}. \quad (3)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Весеннее цветение водохранилища*

Весеннее цветение Можайского водохранилища связано с обильным развитием диатомовых водорослей. Оно начинается обычно в апреле, наиболее ранняя дата начала цветения – 7 апреля, наиболее поздняя – 16 мая. Минимальная продолжительность периода этого цветения – 4, максимальная – 28 сут. По длине водохранилища четко прослеживается неодновременность начала цветения, а затем и его окончания – от верховий водохранилища к плотине с отставанием в 3–4 дня. Например, если на верхнем участке водохранилища цветение наступает 26 апреля, то в центральной части (Красновидовский плес) – 29 апреля, а в приплотинном плесе – 3 мая. Окончание цветения происходит в той же последовательности. Более раннее цветение верхних участков водохранилища связано с тем, что в них поступают биогенные вещества с речными водами, они мелководны, хорошо прогреваются и перемешиваются.

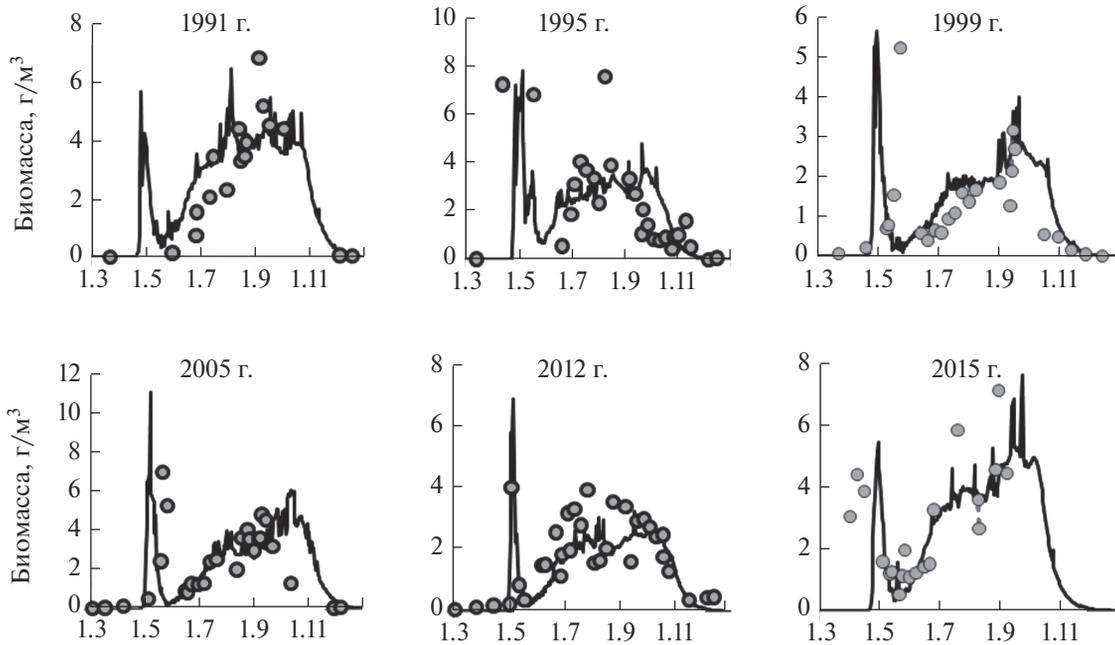


Рис. 1. Рассчитанные по модели (черная линия) и наблюдаемые (точки) величины биомассы фитопланктона в поверхностном слое приплотинного плеса Можайского водохранилища.

Модельные расчеты показали, что между биомассой диатомовых водорослей и факторами окружающей среды немного статистически значимых связей. Из 18 рассмотренных авторами гидрометеорологических, гидрохимических и водохозяйственных показателей, которые могли бы оказывать влияние на цветение диатомовых водорослей, высоко значимая корреляция индекса цветения диатомовых водорослей (ИЦВ<sub>д</sub>) обнаружена только с коэффициентом замедленности весеннего наполнения:  $K_{\tau} = \tau/\tau_0$  ( $\tau$  и  $\tau_0$  – длительность половодья данного года и средняя многолетняя его длительность, сут ( $r = 0.45$ ,  $p = 0.95$ )). Эта связь показывает, что чем медленнее происходит весеннее наполнение водохранилища, тем выше средняя биомасса диатомовых. Связано это, вероятно, с тем, что при слабом развитии весенних процессов на водосборе большая часть весенних вод поступает в водоем в виде богатого биогенами почвенного, а не склонового стока, характерного для бурной весны. Кроме того, при длительной холодной весне в водоеме дольше поддерживаются благоприятные для холоднлюбивых диатомовых водорослей температурные условия.

Рассчитанный ход изменений биомассы диатомовых водорослей характеризуется острыми пиками. При этом ее максимальные величины имеют более тесную статистическую связь с рассматриваемыми предикторами, чем ее средние значения в поверхностном слое.

ИЦВ<sub>д</sub> очень слабо коррелирует с количеством штилевых дней и рассчитанным по модели притоком фосфора и азота с водосбора водохранилища за время цветения воды диатомовыми водорослями. Со всеми остальными факторами связь ИЦВ<sub>д</sub> статистически незначима. Также незначительно зависит от абиотических факторов и продолжительность периода цветения диатомовых водорослей, что еще раз подтверждает малую предсказуемость цветения воды этой группой фитопланктона.

Оценка зависимости ИЦВ<sub>д</sub> от концентрации кремния не анализировалась, поскольку по многократным наблюдениям, например в 2018 г. по данным шести съемок (с февраля по сентябрь), его содержание в основной водной массе водохранилища варьировало в диапазоне 0.8–3.0 мг/л весной и летом, а в зимней водной массе увеличивалось до 6 мг/л. В другие годы содержание в воде кремния весной достигало даже 10–12 мг/л и выше.

Подсчеты ИЦВ<sub>д</sub> для диатомовых водорослей в приплотинном плесе водохранилища показали исключительно большую межгодовую изменчивость этого показателя за рассматриваемый многолетний период. Коэффициент вариации ИЦВ<sub>д</sub> = 37%, продолжительности периода цветения – 31%.

Если уменьшать интенсивность наполнения водохранилища увеличением сброса воды из него в весенний период, то увеличатся продольный водообмен в период половодья и вынос из водохра-

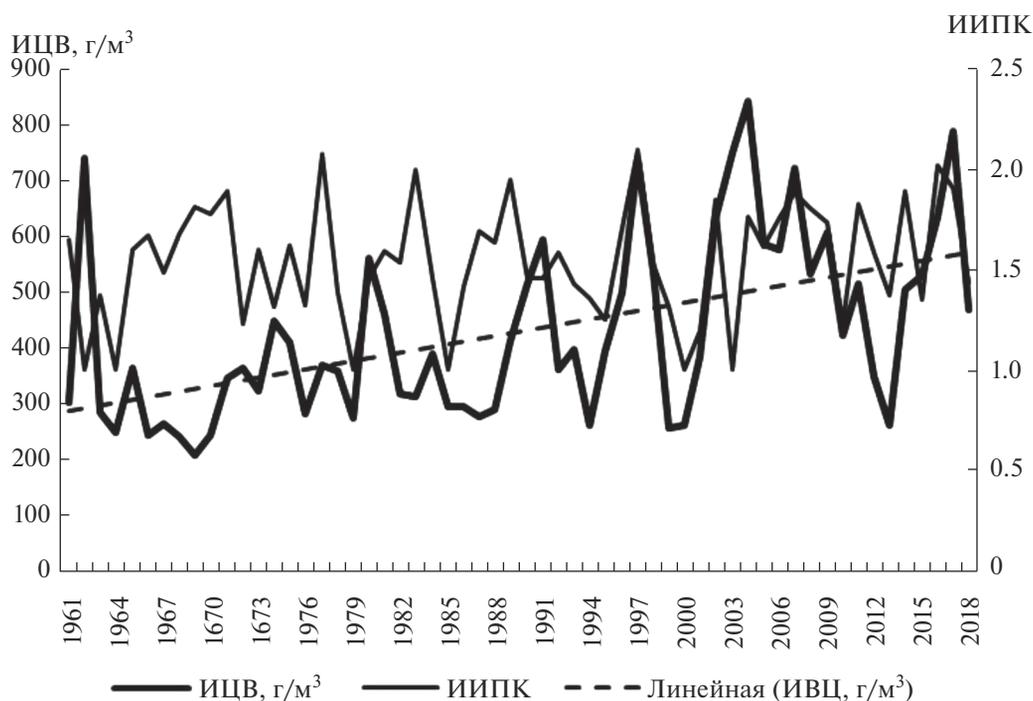


Рис. 2. Изменение от года к году ИЦВ<sub>цб</sub>, ИИПК в центральном плесе Можайского водохранилища и линейный тренд ИЦВ<sub>цб</sub>.

нилища насыщающих водную толщу биогенных веществ и развивающегося фитопланктона, что может привести к ослаблению весеннего цветения.

#### Летне-осеннее цветение водохранилища

Индекс цветения цианобактериями (ИЦВ<sub>цб</sub>) более тесно связан с большинством анализируемых факторов. Высоко значима корреляционная связь ИЦВ<sub>цб</sub> со следующими факторами: четырьмя гидрологическими – объемами притока воды в половодье ( $r = -0.49$ ) и во время летне-осенних паводков ( $r = 0.42$ ), коэффициентом водообмена водохранилища в половодье ( $r = -0.37$ ), скоростью переноса водных масс ( $r = 0.44$ ); двумя метеорологическими – скоростью ветра ( $r = -0.40$ ) и количеством штормовых дней ( $r = 0.45$ ); четырьмя гидрохимическими – притоком с водосбора фосфора ( $r = 0.93$ ) и азота ( $r = 0.92$ ), поступлением из донных отложений фосфора ( $r = 0.36$ ) и азота ( $r = 0.34$ ); двумя водохозяйственными – соотношением объема воды в водохранилище в конце его зимней сработки и объема вод половодья ( $r = 0.50$ ), предвесенней сработкой водохранилища ( $r = -0.36$ ).

Менее значима корреляционная связь ИЦВ<sub>цб</sub> с еще четырьмя факторами: с поступлением солнечной радиации, температурой воды в период летнего цветения, слоем атмосферных осадков и интенсивностью наполнения водохранилища.

Разнообразие факторов и их совместное влияние на экосистему водохранилища, нередко противоречивое, не позволяет объяснить значительную межгодовую изменчивость цветения в летне-осенний сезон [25].

Цветение воды в водохранилище цианобактериями многократно продолжительнее, чем весеннее цветение, и поэтому ИЦВ<sub>цб</sub> составляет большую величину в суммарном индексе цветения водохранилища водорослями всех отделов планктона во все годы существования водохранилища. Межгодовая изменчивость интенсивности летне-осеннего цветения, рассчитанная по результатам моделирования режима биомассы фитопланктона за 1961–2018 гг. (рис. 2), и частота чередования теплой и холодной погоды в сезон цветения этих водорослей, характеризуемая ИИПК (табл. 1), послужили основой для проверки гипотезы хорошей связи между этими двумя показателями.

Межгодовая изменчивость и линия тренда ИЦВ<sub>цб</sub> в центральном плесе (рис. 2) мало отличаются от таковых для ИЦВ<sub>цб</sub> в приплотинном плесе [25], что свидетельствует о единых причинах изменчивости интенсивности цветения для большей части акватории Можайского водохранилища. Как и в приплотинном плесе, в центральном районе водохранилища в первые годы его существования диапазон изменчивости ИЦВ от года к году был в 3 раза меньше, чем в последние годы рассматриваемого многолетнего перио-

**Таблица 1.** Продолжительность сезона цветения синезеленых водорослей  $t$ , сут, число погодных фаз  $N_{\phi}$ , ИИПК и ИЦВ, г/м<sup>3</sup>, в центральном плесе Можайского водохранилища (по данным модельных расчетов)

Год	$t$	$N_{\phi}$	ИИПК	ИЦВ	Год	$t$	$N_{\phi}$	ИИПК	ИЦВ
1961	144	6	1.64	301	1990	102	4	1.45	514
1962	133	2	1.00	737	1991	152	4	1.45	591
1963	174	4	1.36	282	1992	120	4	1.58	359
1964	124	2	1.00	247	1993	108	4	1.43	395
1965	125	10	1.59	361	1994	130	4	1.36	259
1966	97	6	1.67	241	1995	150	4	1.25	393
1967	132	4	1.48	263	1996	145	6	1.70	498
1968	119	4	1.67	239	1997	123	8	2.09	734
1969	108	4	1.81	206	1998	128	4	1.52	535
1970	132	6	1.77	242	1999	184	4	1.31	254
1971	129	6	1.89	343	2000	114	2	1.00	260
1972	163	4	1.23	363	2001	120	4	1.19	382
1973	116	6	1.59	321	2002	108	8	1.84	631
1974	134	4	1.31	446	2003	139	2	1.00	749
1975	136	6	1.62	409	2004	145	8	1.76	840
1976	91	4	1.32	280	2005	156	6	1.61	585
1977	110	8	2.07	367	2006	132	6	1.75	573
1978	100	4	1.38	358	2007	152	8	1.88	720
1979	133	2	1.00	272	2008	128	6	1.80	531
1980	121	4	1.46	560	2009	145	8	1.73	605
1981	153	6	1.58	459	2010	156	4	1.23	422
1982	110	6	1.53	317	2011	149	8	1.82	512
1983	96	6	1.99	312	2012	132	6	1.58	347
1984	137	8	1.45	388	2013	156	4	1.37	259
1985	118	2	1.00	294	2014	154	8	1.89	503
1986	120	6	2.09	293	2015	141	4	1.34	527
1987	133	6	1.69	275	2016	144	8	2.02	632
1988	148	6	1.63	289	2017	117	8	1.90	787
1989	134	10	2.18	411	2018	171	4	1.43	466

да. Причем значения ИЦВ в наименее продуктивные годы увеличились незначительно, тогда как в наиболее продуктивные годы они возросли вдвое, что и определило хорошо выраженный положительный тренд ИЦВ в Можайском водохранилище.

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, продолжительность летне-осеннего цветения сильно меняется: от 91 сут в 1976 г. до 184 сут в 1999 г. и в среднем составляет 132 сут. Тем не менее связь продолжительности сезона цветения и ИИПК статистически не значима ( $r = -0.12$ ), что свидетельствует об асинхронности межгодовой изменчивости этих характеристик.

Весь ряд рассчитанных за 58 лет значений ИИПК и ИЦВ был разбит на два периода: 1961–

1971 гг. – интенсивного переформирования ложа водохранилища в первые годы после его образования, 1972–2018 гг. – относительной стабилизации сформированного илистыми отложениями покрова дна глубинных участков.

В начальный период формирования экосистемы водохранилища особенно сильное цветение было отмечено в 1962 г. (табл. 1) – второй год затопления поймы, когда происходило активное выделение в придонный слой воды продуктов бактериального разложения органических веществ в затопленном почвенном покрове дна. Экспериментально было показано, что через год после затопления лугово-болотной почвы, отобранной со дна Можайского водохранилища, концентрация ортофосфатов в воде над ней воз-

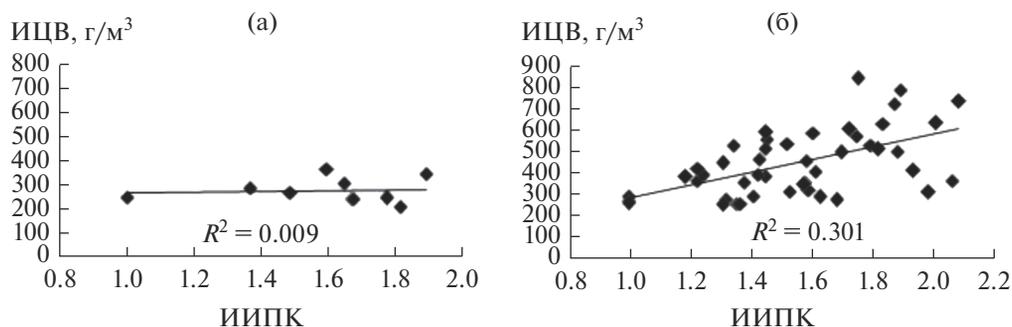


Рис. 3. Корреляционная связь между ИЦВ<sub>цв</sub> и ИИПК в 1961–1971 гг. (а) и 1972–2018 гг. (б).

растает до 7.18 мг/л [9]. В первые годы существования водохранилища происходит активная переработка абразионных участков берегов, при которой глинисто-песчаные продукты абразии доминируют при формировании донных отложений и образующийся детрит частично перекрывается минеральными веществами, что препятствует обогащению трофогенного поверхностного слоя воды биогенными продуктами разложения оседающего детрита при штормовом взмучивании [5]. В эти годы в придонных слоях очень медленно формировалась зона аноксии и не наблюдалось ее повсеместное существование. После исключения из первого периода аномального по сильному цветению 1962 г. корреляционная связь между ИИПК и ИЦВ в это десятилетие отсутствовала (рис. 3а).

В последующий период (1972–2018 гг.) с уже сформированным покровом дна глубинных участков из илистых отложений выявленная ранее зависимость продуктивности от контрастности погоды [29] стала весьма вероятной благодаря полученной статистически высоко значимой связи ИЦВ с ИИПК (рис. 3б). Коэффициент корреляции этих индексов равен 0.55 (при  $n = 46$  значимый  $r_{\beta=1\%} = 0.384$  [22]). Из этого периода исключен 2003 г., ИЦВ которого не соответствует его ИИПК. Особенностью этого года было очень высокое значение ИЦВ при всего лишь двухфазной изменчивости температуры поверхностного слоя (фаза нагревания с 6 июня до 28 июля при максимальной среднесуточной температуре воды 27.20°C и последовавшая за ней фаза охлаждения до 22 октября). Двухфазными были также термические режимы в 1979, 1985 и 2000 гг., но интенсивность цветения в 2003 г. была в 2–3 раза выше, чем в эти годы (табл. 1). Причиной этого был аномально большой приток биогенных веществ, поступивших в водоем с водами многоводных июльских паводков, вследствие чего биомасса цианобактерий в июле–августе возросла до 4–6 мг/л. Температура речных вод превышала температуру трофогенного слоя, поэтому воды паводков поступали в основном в поверхностный слой, так

как их плотность была наименьшая и препятствовала конвективному перемешиванию. К тому же в фазу нагревания и в августе скорость ветра  $\leq 2$  м/с при среднем значении 1.1 м/с, что исключало глубокое ветровое перемешивание поверхностных слоев воды в водоеме. В сентябре произошел всплеск цветения цианобактерий (до 12.7 мг/л в центральной части водохранилища), связанный с поступлением в водоем большого объема паводковых вод (расходы воды сентябрьского паводка в р. Москве превышали ее расходы во время весеннего половодья) и, соответственно, большого количества биогенных веществ, что продлило цветение водорослей до 22 октября. На фоне медленного осеннего охлаждения речных вод и трофогенного слоя в водохранилище конвективное перемешивание усиливалось в ветреную погоду (средняя скорость ветра в сентябре составляла 2.4 м/с при среднесуточной в некоторые сутки до 6 м/с). Это сопровождалось выносом большого количества биогенных веществ (дополнительно к их поступлению с речным притоком), накопленных в гипolimнионе за предшествующий длительный период безветренной погоды. Эти особенности погодных условий привели к тому, что 2003 г. оказался одним из наиболее продуктивных за время существования водохранилища, хотя значение его ИИПК было минимальным.

Влияние контрастности изменчивости погоды на продуктивность, по-видимому, характерна и для водоемов Европы, для которых лимнологом В. Оле установлено [31], как напоминает С.И. Кузнецов [11], что особенность структуры их биоактивности состоит в том, что вероятность цветения в них в 1.5 раза выше, чем в экваториальных озерах. Доля оседающего на дно органического вещества в структуре биоактивности озер умеренных широт – самая высокая среди озер мира, а скорость деструкции органического вещества в илах – в 1.5–2 раза превышает седиментацию легко минерализуемого бактериями детрита. Это указывает на заметный вклад внутренней биогенной нагрузки в цветение водоемов замедленного водообмена.

## ВЫВОДЫ

Весеннее цветение водохранилища определяется диатомовыми водорослями, имеет непродолжительный характер (от 4 до 28 сут) и зависит, во-первых, от интенсивности наполнения водохранилища водой половодья и количества приносимых ею растворенных биогенных веществ; во-вторых – от длительности интенсивного конвективного перемешивания при штилевой погоде во время прогрева поверхностного слоя воды от 0 до 10–15°C – температуры, благоприятной для развития холодолюбивых диатомовых водорослей. Возникающий в период весеннего цветения большой биогидрохимический круговорот распространяется в водоеме повсеместно до дна пойменных участков, а нередко и до дна русловой ложбины, что интенсифицирует весеннее цветение дополнительным выносом в трофогенный слой воды, обогащенной биогенами.

Особенность слабопроточного водохранилища многолетнего регулирования стока с замедленным водообменом – большая продолжительность летне-осеннего цветения – до 180 сут. Оно вызвано цианобактериями и связано, как правило, с контрастностью погоды. Чем продолжительней фаза охлаждения, тем сильнее снижается температура поверхности воды в эту фазу; и чем больше таких фаз, тем интенсивнее вспышки цветения цианобактериями. Они возникают при смене погоды холодной фазы солнечной и штилевой погодой теплой фазы. В фазу холодной и пасмурной погоды с возникающими конвективно-ветровыми вихрями происходит смена малого биогидрохимического круговорота веществ в эпилимнионе большим круговоротом биогенных веществ вследствие разрушения стратификации и вовлечения в перемешивание вод гипolimниона, насыщенных регенерируемыми биогенными веществами в илах и в придонном анаэробном слое воды. Эту закономерность показывает статистически высоко значимая связь между интегральным индексом контрастности погоды и индексом цветения цианобактериями в почти полувековом ряду колеблющейся от года к году продуктивности слабопроточного стратифицированного в летне-осенний период водохранилища. Однако из этой закономерности бывают исключения, например двухфазный летне-осенний сезон 2003 г., отличавшийся аномально теплой и исключительно дождливой погодой с многоводными летне-осенними паводками с большим содержанием в воде биогенных веществ.

Контрастность изменчивости летне-осенней погоды особенно характерна для климата умеренных широт. Изменчивость погодных условий в значительной мере способствует формированию ярко выраженной внутрисезонной и годовой из-

менчивости продуктивности водохранилищ многолетнего регулирования стока, в том числе и водохранилищ системы водоснабжения г. Москвы.

Авторы благодарны М.Г. Ершовой (МГУ им. М.В. Ломоносова) за активное участие в лимнологических расчетах и анализе полученных результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виленина М.Н., Сахарова М.И.* Химизм воды, бактериальное население и фитопланктон Можайского водохранилища и изменения их в реке Москве (наблюдения с апреля 1960 г. по июль 1961 г.) // Учинское и Можайское водохранилища. М.: Изд-во МГУ, 1963. С. 389–406.
2. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / Под ред. *К.К. Эдельштейна*. М.: Перо, 2015. 286 с.
3. *Гончаров А.В., Гречушникова М.Г., Пуклаков В.В.* Новые возможности классического метода: автоматизированное определение первичной продукции и деструкции органического вещества в водоеме // Биология внутр. вод. 2018. № 4. С. 107–110.
4. *Гречушникова М.Г.* Изменчивость термического состояния Можайского водохранилища в вегетационный период. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2002. М.: 23 с.
5. *Даценко Ю.С.* Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
6. *Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К.* Анализ влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона в малопроточном стратифицированном водохранилище // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2017. № 10. С. 75–85.
7. *Ершова М.Г.* Моделирование генетической структуры Можайского водохранилища // Вод. ресурсы. 2003. Т. 30. № 2. С. 142–153.
8. *Ершова М.Г.* Результаты расчета состава вод отдельных участков водохранилища с помощью балансовой модели // География и природ. ресурсы. 1984. № 2. С. 135–141.
9. *Зайдельман Ф.Р., Гаджиев Я.М., Рожкова Л.С.* Опыт моделирования процессов взаимодействия затопленных почв и грунтов с водами водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 4. С. 127–136.
10. *Костоусова М.Н.* Особенности очистки воды от фитопланктона // Вод. ресурсы. 1984. № 3. С. 97–104.
11. *Кузнецов С.И.* Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука, 1970. 440 с.
12. *Лебедев Ю.М., Широкова Е.Л.* Некоторые факторы среды, определяющие продукцию Можайского водохранилища // Биол. науки. 1972. № 6. С. 116–118.
13. *Левшина Н.А.* Структурные особенности фитопланктона Можайского водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1980. Вып. 5. С. 149–154.

14. *Левшина Н.А.* Фитопланктон Можайского водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1973. Вып. 2. С. 50–55.
15. *Левшина Н.А., Сахарова М.И.* Планктон и бентос // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1979. Вып. 3. С. 262–274.
16. Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище. М.: Изд-во МГУ, 1995. 80 с.
17. *Орлеанская О.Б.* Зимний фитопланктон Можайского водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1978. Вып. 4. С. 189–191.
18. *Пуклаков В.В.* Гидрологическая модель водохранилища. М.: ГЕОС, 1999. 95 с.
19. *Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К.* Расчеты плотностных течений в Можайском водохранилище // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 94–104.
20. *Соколов Д.И.* Снижение стока органических веществ р. Москвы в Можайском водохранилище // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Тр. Междунар. науч.-практ. конф. Пермь: ПГУ, 2013. С. 175–180.
21. *Телитченко М.М., Цыцарин Г.В., Широкова Е.Л.* Микроэлементы и “цветение” воды // Гидробиол. журн. 1970. № 6. С. 241–250.
22. *Урбах В.Ю.* Биометрические методы. М.: Наука, 1964. 415 с.
23. *Чернега С.С., Эдельштейн К.К.* Принципы гидроэкологической реконструкции долинных водохранилищ // Эколого-гидрологические проблемы изучения и использования водных ресурсов. Казань: АН РТ, 2006. С. 452–455.
24. *Шушкевич Е.В., Карпушенко А.В., Полянин В.О., Столярова Е.А.* Водоподготовка и управление качеством воды в условиях развития фитопланктона на примере московского водоисточника // Водоснабжение и сан. техника. 2010. № 10. Ч. 1. С. 13–15.
25. *Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Даценко Ю.С.* Экспериментально-теоретические основы диагноза и прогноза формирования цветения в водохранилищах – источниках муниципального водоснабжения // ВОДА MAGAZINE. 2017. № 4 (116). С. 34–40.
26. *Эдельштейн К.К.* Водохранилища России, экологические проблемы и пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
27. *Эдельштейн К.К.* Гидрология озер и водохранилищ. М.: Перо, 2014. 398 с.
28. *Эдельштейн К.К.* Экологическое благоустройство московских водохранилищ // Природа. 1997. № 9. С. 92–97.
29. *Эдельштейн К.К., Гречушников М.Г., Гончаров А.В.* Влияние изменчивости погоды на биопродуктивность водохранилища // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2020. № 2. С. 36–44.
30. *Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Даценко Ю.С., Ерина О.Н., Соколов Д.И.* Интенсивность поступления кислорода из пресных водоемов // Вод. ресурсы. 2018. № 3. С. 309–318.
31. *Ohle W.* Beitrage zur Productionsbiologie der Gewasser // Archiv fur Hydrobiol. 1955. Suppl. V. 22 (3–4). P. 456–479.
32. *Yershova M.G.* Modelling of the Genetic Composition of Water Masses in Two Valley Reservoirs in the Volga Basin // Int. Revue gesamtent Hydrobiol. V. 81. 1996. № 2. P. 293–313.

## СВОЙСТВА ПРИРОДНЫХ ВОД, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ИХ МИКРОСТРУКТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИЕЙ<sup>1</sup>

© 2021 г. В. И. Данилов-Данильян<sup>а</sup>, \*, О. М. Розенталь<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: vidd@iwp.ru

Поступила в редакцию 25.05.2020 г.

После доработки 14.10.2020 г.

Принята к публикации 16.10.2020 г.

Свойства природных вод во многом определяются уникальными характеристиками этой жидкости, однако обычно они учитываются далеко не в полной мере, и полагается адекватным представлением о ней как о сплошной среде с инородными микрокомпонентами. Такой подход представляется недостаточным для решения задач управления водными ресурсами и выбора инновационных путей развития водоемких отраслей экономики. Более полное исследование ресурсно-хозяйственных свойств воды требует опоры на молекулярно-динамические модели этой субстанции, наиболее важные из них описаны в работе. Показано, что многие водно-экологические процессы определяются формированием ионно-молекулярных ассоциатов и микроструктурной самоорганизацией, обусловленной специфическими свойствами сетки водородных связей. Статья представляет собой аналитический обзор (с некоторыми теоретико-экспериментальными данными авторов), направленный на лучшее понимание читателями молекулярно-динамических свойств воды при оценке ряда важных для хозяйственной деятельности характеристик водных ресурсов.

*Ключевые слова:* водные ресурсы, свойства воды, водородные связи, микроструктурная самоорганизация, ионно-молекулярные ассоциаты, гидратационные комплексы.

DOI: 10.31857/S0321059621020036

### ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы обладают высокой (и непрерывно растущей) потребительской ценностью и характеризуются многоцелевым использованием. Уникальные свойства природной воды обуславливают ее системообразующую роль в биосфере, гидросфере и техносфере Земли. Часть этих свойств широко известна [1, 7, 12], причем в водохозяйственной практике принято удовлетворяться эмпирическими данными, не вникая в природу явлений и ограничиваясь представлением о воде как о сплошной среде с инородными микрочастицами. Между тем микроструктура этой жидкости проявляется на макроскопическом уровне. Таков механизм образования шестиугольной формы снежинок, в основе которого лежит кристаллическая структура гексагонального льда; то же касается формы ячеек Бенара в слое воды с вертикальным градиентом температуры, вязкоупругих свойств воды, текучей, но упругой при ударных нагрузках [8], эффекта “несмешива-

емости” речных потоков [14] и изменения динамики течений в глубинах океана.

Воде свойственны внутримолекулярные ковалентные и межмолекулярные водородные связи, благодаря чему она обладает большой статической диэлектрической проницаемостью и дипольным моментом молекул. Роль этих факторов в формировании свойств водных ресурсов исследована недостаточно. Актуален анализ механизмов формирования свойств природной воды с опорой на ее молекулярно-динамические модели.

Угроза глобального водного кризиса определяет неизбежность структурной перестройки мировой экономики и развития инновационных производств с их повышенными требованиями к режимам водопользования и качеству воды [6]; в таких условиях следование упрощенным эмпирическим представлениям неэффективно. Цель данной обзорно-концептуальной статьи – привлечь внимание гидрологов и специалистов в сфере управления водными ресурсами к явлениям зависимости их макросвойств от микроструктурных свойств природной воды в ее жидком и твердом агрегатном состоянии.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем РАН (тема 0147-2019-0004, государственная регистрация № АААА-А19-119040990079-3).

**Таблица 1.** Физико-химические характеристики воды и льда ( $\eta$ , Па·с – вязкость;  $\beta_T$ , Па<sup>-1</sup> – изотермическая сжимаемость (приблизительно равная адиабатической сжимаемости) при 0°C;  $C$ , кДж/кг·град – теплоемкость при 0°C;  $U$ , м/с – скорость звука;  $\sigma$ , Н/м – поверхностное натяжение;  $D$ , см<sup>2</sup>/с – коэффициент диффузии молекулы воды;  $\epsilon$  – статическая диэлектрическая проницаемость при 0°C)

Фаза	$\eta$	$\beta_T$	$C$	$U$	$\sigma$	$D$	$\epsilon$
Жидкая	$10^{-3}$	$46 \times 10^{-11}$	4.2	1500	0.073	$10^{-6}$	88
Твердая	$10^{13}$	$1.2 \times 10^{-10}$ (7°C)*	2.1	4000	0.5**	$10^{-10}$	97

\* Коэффициент при давлении в интервале  $(1-5) \times 10^7$  Па.

\*\* Оценка, основанная на представлении о том, что поверхность льда характеризуется одной ненасыщенной водородной связью на каждой гексагональной ячейке.

## ПРИРОДНАЯ ВОДА КАК ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Чистой воды в природе практически не существует, поскольку она обладает повышенной растворяющей способностью по отношению к веществам с ионной и полярной связью. Радиус вовлеченных в водную матрицу ионно-молекулярных частиц не превышает 1 нм, а коллоидных – 100 нм. На Земле преобладают океанические воды, включающие в себя практически все химические элементы, хотя более 99% общей массы растворенных веществ составляют ионы  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ , соотношения которых постоянны во всех океанах, а суммарная концентрация достигает 30–40 г/дм<sup>3</sup>.

В отличие от океанических вод, воды суши обычно являются разбавленными растворами с концентрацией примеси, относительно редко превышающей 100 мг/дм<sup>3</sup>. Физико-химические характеристики подобных растворов практически такие же, как у чистой воды, что позволяет пользоваться законом Рауля для давления насыщенного пара, а для добавок электролитов – моделью Дебая–Хюккеля, рассматривающей ион в виде жесткого шарика, окруженного ионной атмосферой. Также и структура природных (пресных) растворов близка к структуре чистой воды, но при повышенном загрязнении постепенно приближается к структуре кристаллогидратов с образованием макромолекул, звенья которых обладают дальним порядком [4, 11, 17].

Предварительное представление о макроскопических характеристиках воды, обусловленных ее молекулярно-динамическими свойствами, удобно анализировать, сравнивая их со свойствами обычного льда Ih-модификации, структура которого хорошо известна (табл. 1) [7, 10]. Из табл. 1 видно, что воде и льду свойственны малая сжимаемость и высокая скорость распространения звука. Первое обстоятельство указывает на единую природу сил межмолекулярного взаимодействия, обеспечивающих близкие значения приведенных величин, а второе – на то, что жидкая и твердая фазы воды обладают сходными упругими свой-

ствами. В то же время целый ряд характеристик этих фаз резко различается, чем и определяются их важные хозяйственные свойства. Таковы следующие:

пониженный коэффициент самодиффузии во льду и повышенная на много порядков вязкость этой фазы (поликристаллической);

пониженное значение константы диссоциации молекул воды во льду;

повышенное поверхностное натяжение у льда при том, что и у воды оно больше, чем у любой другой жидкости, кроме ртути (поверхностное натяжение этой абсолютно чистой жидкости настолько велико, что было бы возможно “хождение по ртутям”; наличие же примесей резко снижает поверхностное натяжение).

В отличие от других жидкостей, объем жидкой воды меньше, чем объем эквивалентной массы льда. Из рис. 1 [7, 10] видно, что после быстрого расширения нагреваемого льда объем вещества резко уменьшается при плавлении, причем коэффициент объемного расширения в воде – отрицательный, вплоть до 4°C. Последнее обстоятельство играет важную роль в биосфере, так как в результате лед образуется на поверхности водоемов, не позволяя им промерзнуть до дна и тем самым не давая погибнуть рыбам и многим другим представителям водной фауны в зимнее время.

В целом при плавлении термодинамические свойства воды меняются в разы, в то время как кинетические – на порядки. Так, коэффициент самодиффузии воды на четыре порядка выше, чем льда, а подвижность протона, напротив, на порядок ниже вследствие более совершенной сетки водородных связей в твердой фазе. Различна и растворимость частиц взвешенных и/или растворенных в воде веществ в конденсированных фазах. Например, максимальная насыщенность воды хлористыми, азотнокислыми и углекислыми солями калия и натрия может достигать 50% по весу, тогда как растворимость любых веществ (кроме фторида аммония  $NH_4F$ ) во льду крайне низкая.

Ясность в вопросе о причинах близости значений таких коэффициентов, как  $\beta_T$ , вносит сопо-

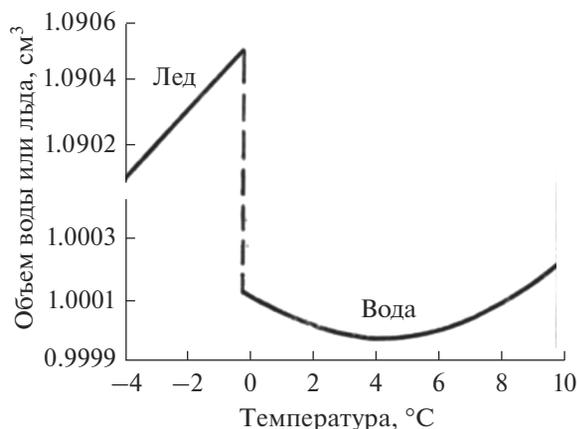


Рис. 1. Зависимость объема конденсированных фаз воды от температуры вблизи точки плавления льда.

ставление теплоты фазовых переходов воды и пара из льда. При равновесных изобарно-изотермических условиях эти показатели равны  $\sim 80$  и  $700$  кал/г соответственно. Поскольку они представляют собой произведение температуры фазового перехода на разность энтропий соответствующих фаз, то можно видеть, что затраты энергии на плавление составляют  $80/700 \approx 0.11$  от ее затрат на возгонку. Если при возгонке вся запасенная потенциальная энергия переходит в кинетическую, то при плавлении на фазовый переход требуется гораздо меньшая ее доля. Следовательно, в жидкой воде нарушено лишь  $\sim 11\%$  водородных связей (поэтому вода обладает высокой теплотой парообразования, что делает ее хорошим энергоносителем), что согласуется с представлениями О.Я. Самойлова [11] о “льдообразной” (частично-каркасной) модели структуры воды с малой долей “некаркасных” молекул. По Л. Полингу, таковы “гидрофобные” молекулы в клатратной структуре [11, 17]; по Г. Фрэнку и В. Вэну, это молекулы, “плавающие” в льдоподобных “мерцающих кластерах”, объединяющих до 100 молекул [9, 10, 17].

Подобные модели опираются на представление о “льдоподобности” структуры жидкой воды. Полученная методом молекулярной динамики оценка молекулярной координации тетраэдрической (льдоподобной) структуры воды, обусловленной  $sp^3$ -гибридизацией орбиталей кислорода, приведена на рис. 2 [9, 15]. Здесь главный максимум на кривой радиального распределения, отвечающий за первую координационную сферу, расположен на расстоянии 28 нм; второй, размытый — на расстоянии 45 нм; третий, еще более размытый — на расстоянии 70 нм.

Площади под максимумами на кривой радиального распределения определяются координационными числами молекул, соседних с выбранной. Это число для льда равно 4, для жидкой

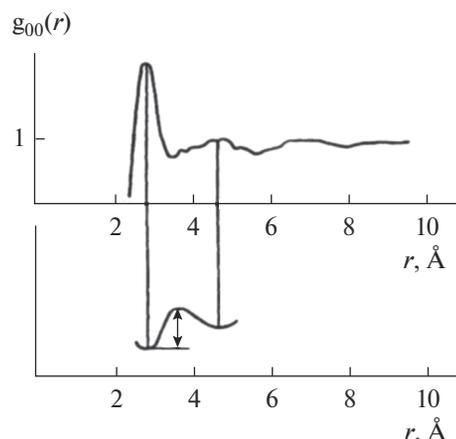


Рис. 2. Кривые радиального распределения атомов кислорода в чистой воде; внизу — схема, поясняющая картину теплового движения молекул путем активационных скачков между их временными положениями равновесия, разделенными потенциальным барьером [8]. По оси абсцисс — расстояние от выбранной частицы (ангстрем), по оси ординат — радиальная функция распределения.

воды 4.4 и почти не меняется с температурой. Таким образом, большая часть межмолекулярных водородных связей при плавлении льда не разрушается. А повышение координационного числа указывает на прочность сетки этих связей, которые при этом достаточно лабильны. Именно прочность и упругость в сочетании с гибкостью, легкой деформируемостью сетки таких связей [8] обеспечивают целый ряд малоизученных пока макроскопических проявлений молекулярно-динамических свойств воды. При этом подвижность молекул воды осуществляется через дефекты сетки водородных связей. Это позволило предложить модель вращательных переориентаций молекул в жидкой воде как важнейшую стадию подвижности (рис. 3). Здесь подразумевается, что основное количество молекул включено в сетку водородных мостиков, а малая их часть локализована в пустотах каркаса, образованного этой сеткой. Таковы “каркасные” и “полостные” молекулы, интенсивный обмен между которыми обеспечивает молекулярную подвижность в жидкости, — это наглядная, но несколько устаревшая модель, которой, впрочем, вполне достаточно для понимания многих хозяйственно-значимых вопросов водопользования.

Сопоставление физико-химических показателей конденсированных фаз воды делает более понятными некоторые значимые для водохозяйственного управления эффекты, перечисленные ниже.

1. Различная реакция воды на один и тот же импульс силы в зависимости от его продолжительности обусловлена лабильностью структуры

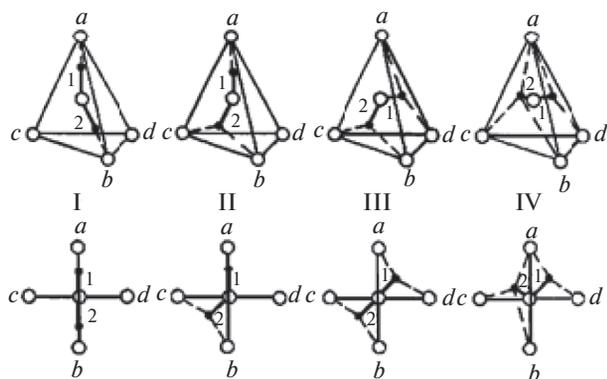


Рис. 3. Конформации молекул воды в модели вращательных переориентаций [15]. *a*, *b*, *c*, *d* – периферийные молекулы; цифры 1, 2 характеризуют направления водородных связей при конформации.

этой жидкости. При медленном воздействии реакция на приложенную внешнюю силу определяется вязкостью, а единственной упругой реакцией будет сопротивление всестороннему сжатию, которое характеризуется изотермической сжимаемостью. При коротких импульсах структура воды обнаруживает упругие свойства. Тогда ее поведение на макроскопическом уровне описывается как гидравлический удар и выполняется обобщенный закон Гука, где модуль сдвига и модуль сжатия имеют смысл адиабатических модулей при быстром воздействии.

2. Вода склонна к химическим изменениям под влиянием внешних механических воздействий. Таков вызвавший в свое время сенсацию эффект спонтанной генерации перекиси водорода в воде при ее продавливании через капилляр [25]. В рамках изложенных представлений это явление сопровождается переходом иона  $\text{OH}^-$  в радикал  $\text{OH}^0$  с выделением электрона. Известны и другие эффекты механохимической нестабильности воды, проявляющиеся при ее интенсивном перемешивании, фильтровании и т.д. [3]. Всего лишь сильное встряхивание (“динамизация”) приводит к появлению в объеме воды оптической неоднородности, свидетельствующей об образовании пузырьков пара, сутками остающихся в квазиравновесии с жидкой фазой.

3. В слабых водных растворах под воздействием электромагнитного излучения или света появляются биологически активные формы кислорода, азота и углекислого газа [5, 28].

4. В речных потоках происходит изменение форм растворенных в воде металлов [16, 26]; эффект заключается в переходе этих металлов из растворимой в нерастворимую форму под влиянием гидродинамического фактора – сброса воды с плотины. Отмечено, например, что связан-

ный в комплексы кадмий переходит при этом в свободное состояние и, оседая на взвешенные частицы, опускается на дно.

Макроскопически гомогенные водные растворы разнообразных низкомолекулярных веществ неоднородны на нано- и мезоуровне (размер неоднородностей варьирует от  $\sim 1$  до  $10^2$ – $10^3$  нм) [29]. Это тип “слабого”, но весьма эффективного и самопроизвольного структурирования жидкости, он важен для адекватного описания реакций и других физико-химических процессов [24]. При этом во многих случаях истинными реагирующими частицами в растворах являются не изолированные молекулы, а их супрамолекулярные агрегаты. В частности, обнаружен феномен существования “критических” концентраций и температуры, при которых происходят неожиданные резкие изменения реакционной способности растворенных веществ и результатов химических реакций с их участием.

#### ВОДОРОДНАЯ СЕТКА КАК ФАКТОР, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДНОЙ ВОДЕ

Вода – мономолекулярное соединение, и, если бы не характерные для нее специфические свойства сетки водородных связей, она должна была бы кипеть при  $+70^\circ\text{C}$ , а замерзать при почти  $-100^\circ\text{C}$ . Этого не происходит именно благодаря способности молекул  $\text{H}_2\text{O}$  к образованию водородных связей. Структура образующейся при этом сетки такова, что в известных 13 кристаллических модификациях льда молекулы участвуют в четырех связях с ближайшими соседями, причем в модификациях Ih, Ic, VII, VIII, X и XI атомы кислорода соседних молекул расположены в вершинах правильного тетраэдра.

Ih-лед, материковый, плавающий, подземный, моно- и поликристаллический, практически единственный существующий в гидросфере Земли, обладает гексагональной структурой (рис. 4). (Имеется еще незначительное количество метастабильной кубической кристаллической разновидности так называемого Ic-льда в верхних слоях атмосферы и ромбической низкотемпературной равновесной формы гексагонального Ih-льда с упорядоченным расположением протонов – льда XI, являющегося сегнетоэлектриком в Антарктиде; в целом же известны три аморфных разновидности этого вещества и 18 кристаллических). Здесь молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  связаны в слоях centrosymmetricными водородными связями, а между слоями – зеркальносимметричными.

Строение сетки водородных связей в жидкой воде сложнее, поскольку здесь имеют место не-

упорядоченные структуры. Методы изучения структуры некристаллических систем позволили получить наглядную картину мгновенной локализации молекул в этой жидкости (рис. 5) [4]. Молекулы с более правильным тетраэдрическим окружением объединяются в относительно упорядоченные кластеры, которые чередуются с кластерами из частиц с искаженным окружением. В итоге образуются рыхлые разветвленные сети, пронизывающие всю структуру. Устойчивость такой структуры сравнительно велика, о чем свидетельствует ее способность к глубокому – до  $-40^{\circ}\text{C}$  – переохлаждению [10].

Плавление льда также не моментальное разрушение кристаллической решетки, оно сопровождается нарастающим числом “топологических кластеров” из дефектов “5 + 7” (пяти- и семи-членных роев), нарушающих строго четверную молекулярную координацию решетки льда [4]. Этот вывод углубляет представление о механизме таяния льда и может способствовать уточнению методов прогноза половодья на основе наблюдений за микроскопическими проявлениями метастабильного состояния твердой фазы.

Представление о том, что вода – микрогетерогенная жидкость, подтверждается рядом исследований [18, 21]. По данным дифракционных экспериментов, отдельные межмолекулярные связи разрушаются почти в 100 раз быстрее, чем кластеры, объединяющие до 30 молекул. Динамическая неоднородность сопровождается коллективными движениями мезоскопических областей приблизительно в одном направлении (на масштабах, промежуточных между макроскопическим и микроскопическим), как это обнаружено в компьютерных моделях [26].

Сетка Н-связей в воде обеспечивает основные свойства этой жидкости – высокую подвижность частиц при их сильном взаимодействии [8]. Это сочетание кинетических и энергетических факторов определяет свойства межмолекулярных связей. Энергия разрыва такой связи для воды составляет 12–20 кДж/моль [20], что на порядок меньше обычной ковалентной энергии, но больше ван-дер-ваальсовой. При этом обеспечивается упругость межмолекулярной сетки воды, при которой ион водорода (протон) оказывается локализован с равной вероятностью около обоих атомов кислорода на линии водородной связи [8], создавая так называемый “протонный беспорядок”. Последним обстоятельством в значительной степени объясняется большая величина диэлектрической постоянной вещества в широком диапазоне частот электромагнитного поля.

Для оценки роли водородных связей в микроструктурной самоорганизации воды и растворов необходимо учитывать их фурукатность (разделенность), определяющую число водородных связей,

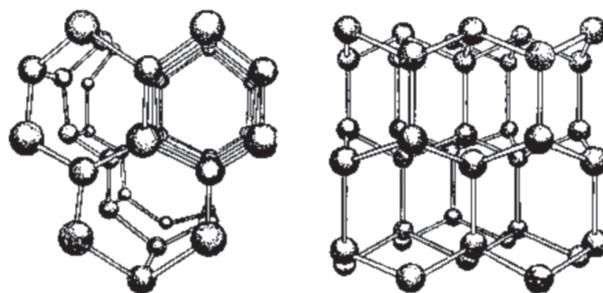


Рис. 4. Схема структуры льда I (показаны атомы кислорода и направления водородных связей) в двух проекциях.



Рис. 5. Пространственная локализация молекул воды с разной тетраэдричностью ближайшего окружения для воды при 301 К. Слева – 20% молекул с окружением, близким к правильному тетраэдру; справа – 20% молекул с наиболее искаженным окружением.

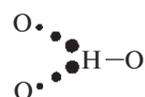


Рис. 6. Бифуркатная связь [17].

которые образует протон одной молекулы с соседними атомами кислорода. Наиболее распространена бифуркатная (перестраиваемая, здесь – трехцентровая) связь (рис. 6), в которой протон одной молекулы воды связан с двумя атомами кислорода двух соседних молекул. “Переключения” бифуркатных связей обеспечивают подвижность (лабильность) сетки водородных связей в жидкости (рис. 7), длина которых и распределение по углам между атомами  $\text{O}\dots\text{H}$  соседних молекул и  $\text{OH}$  каждой из них (рис. 6) способны изменяться без разрыва. Именно специфика Н-связей обеспечивает кинетическую лабильность этой сетки, возможность обмена местами между ее отдельными структурными фрагментами и большой полиморфизм твердой фазы воды [23].

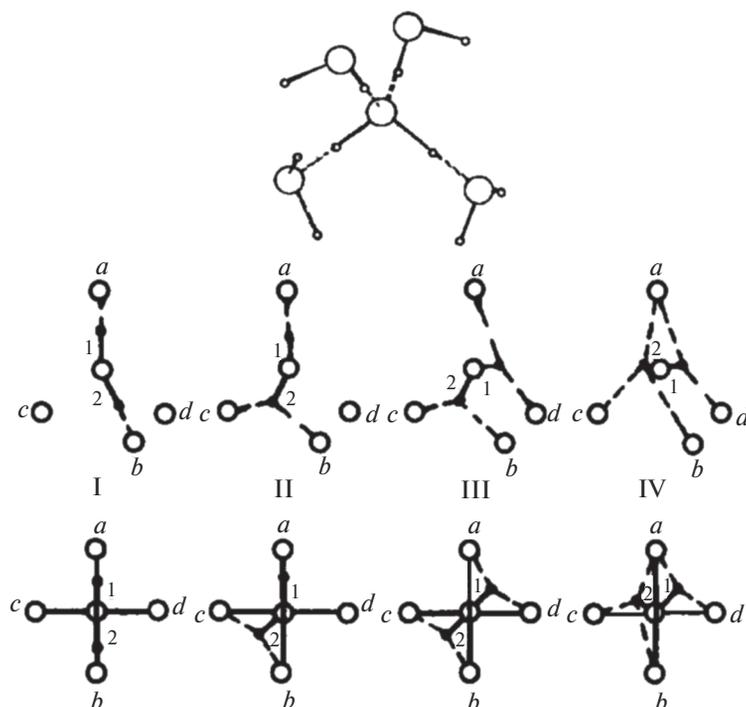


Рис. 7. Пентамолекулярная структурная единица воды и возможные конформеры в пентамолекулярной структурной единице [15]. Обозначения те же, что на рис. 3.

Лабильность пространственной сетки Н-связей в сочетании с ее упругостью, стремлением к сохранению первоначальной конфигурации определяет уникальные макроскопические свойства воды. Один из результатов совместного действия указанных свойств — выраженная тенденция к “выталкиванию” частиц примеси из объема воды и к их объединению в местах дефектов сетки. Такова гидрофобная гидратация и гидрофобное взаимодействие, способствующие агрегации неполярных молекул в разбавленных водных растворах [8].

Гидрофобные взаимодействия определяют устойчивость органических веществ в воде и играют огромную роль в гидрохимических процессах. Таковы, в частности, причины активности отходов фармацевтических производств, опасности органических ксенобиотиков для человека и гидробиоты. Подобные процессы непосредственно связаны с влиянием гидрофобных эффектов на биологические структуры, глобулярные белки, протеины, нуклеиновые кислоты, а также биологические мембраны. Также в рамках синергетического подхода, позволяющего преодолеть разрыв между процессами на молекулярно-динамическом и макромасштабном уровне, необходимо принять, что гидрофобность воды значима для разброса ее состава и свойств [14]. Кроме того, требует исследования роль эффекта гидрофобности при коагуляции, флокуляции, обратноосмо-

тической очистке воды и в других процессах ее обработки (переработки) как хозяйственного ресурса.

Основные эффекты гидрофобности растворов, проявляющиеся на макроскопическом уровне, следующие [8]:

- большие отрицательные значения энтальпии и энтропии растворения;
- минимум молярного парциального объема неэлектролита;
- аномально большие избыточные молярные парциальные теплоемкости;
- большие положительные отклонения от идеальности растворов, невыполнение законов Рауля;
- максимальное повышение вязкости;
- аномальное понижение растворимости мало-растворимых веществ;
- расслаивание раствора;
- мицеллообразование при очень низкой концентрации ПАВ.

#### ГИДРАТАЦИЯ В РАЗБАВЛЕННЫХ РАСТВОРАХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ПРИРОДНУЮ ВОДУ

Вследствие высокой растворяющей способности воды гидросфера является глобальным аккумулятором химических веществ. В результате вза-

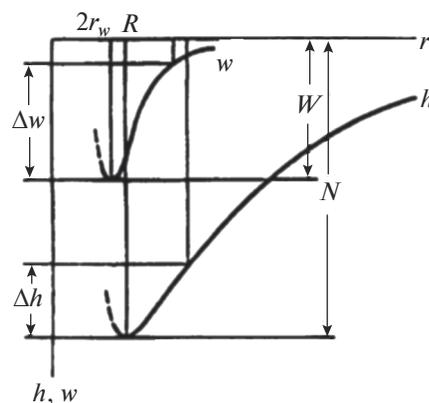
имодействия воды с породами, почвой огромное количество растворенных веществ оказывается в водных объектах. Много уступая природному вкладу по массе таких веществ, антропогенный вклад превосходит его по разнообразию. По данным CAS (Chemical Abstracts Service), ежегодно синтезируются десятки тысяч новых химических соединений, неизбежно попадающих в природные воды. В результате повышается потребность хозяйственной деятельности в чистой воде, а встречается она все реже из-за воздействия этой деятельности на природные системы. Поэтому повышается значение методов и средств кондиционирования воды, в том числе и для водоотведения с целью предотвращения эвтрофирования водных объектов и других нарушений экологического равновесия. Соответствующие технологии требуют основательных представлений о свойствах водных растворов, об энергетических и структурных изменениях, характеризующих гидратацию частиц взвешенных и/или растворенных в воде веществ.

Молекулярно-кинетический подход к явлению гидратации, предложенный О.Я. Самойловым [11, 20], основан на френкелевском активационном механизме подвижности в жидкости с участием ближайших молекул или без них. Предполагается, что в жидкости происходят колебания молекул в их временных положениях равновесия с частотой  $1/\tau_0$  и активированные скачки с

периодом  $\tau = \tau_0 e^{-\frac{E}{RT}}$  ( $E$  – величина потенциального барьера, разделяющего положения равновесия;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная произведению постоянной Больцмана на число Авогадро;  $T$  – абсолютная температура). В координационной оболочке частиц растворенных веществ потенциальный барьер изменяется. Здесь он равен  $E_i$ ,  $E_i - E = \Delta E_i$  – одна из характеристик молекулярно-кинетической модели гидратации. Соответственно, в растворе  $\tau_i = \tau_0 e^{-\frac{E_i}{RT}}$ .

Если  $\Delta E_i > 0$  и  $\tau_i/\tau_0 > 1$ , то реализуется положительная гидратация, означающая, что подвижность молекул воды вблизи иона уменьшается. Если  $\Delta E_i < 0$  и  $\tau_i/\tau_0 < 1$ , то молекулы воды вблизи таких ионов более подвижны, чем в объеме воды, – это случай отрицательной гидратации.

Описанный молекулярно-кинетический подход к гидратации подтвержден экспериментально в [11, 20]. Оказалось, в частности, что благодаря отрицательной гидратации продуктов диссоциации азотнокислого калия вязкость водных растворов этого вещества меньше, чем у чистой воды. Также в пользу отрицательной гидратации свидетельствует повышение коэффициента самодиффузии молекул воды в растворах галогени-



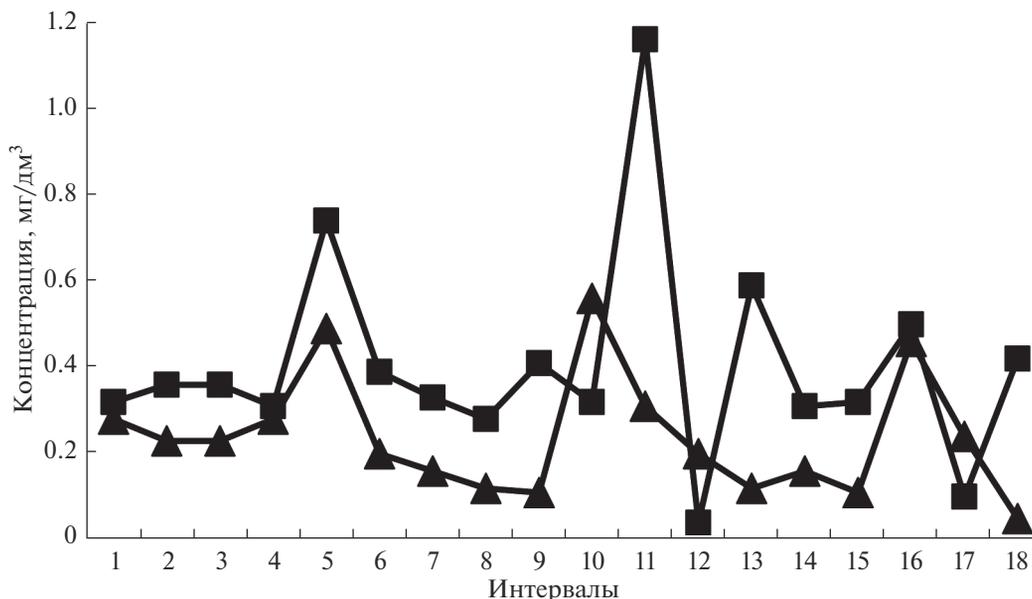
**Рис. 8.** Схема, предложенная в [11, 19], поясняющая явление отрицательной гидратации. Энергия ион-молекулярного взаимодействия ( $w, h$ ) зависит от радиуса ( $r$ ) первой гидратационной оболочки. При этом максимальная глубина потенциальной ямы ( $W, H$ ) для молекул воды достигается при их "максимальном сближении" с центральным ионом ( $2r_w, R$ ), определяющим энергию "активационного скачка" ( $\Delta w, \Delta h$ ) между временными положениями равновесия молекул, что и определяет их подвижность.

дов (кроме фторидов) калия, рубидия и цезия при нормальных условиях.

Одно из объяснений явления отрицательной гидратации – предположение об изменении формы (пологости) потенциальной ямы временной локализации частиц (рис. 8). Другим объяснением может служить модель трехслойной гидратной оболочки иона, из которых первая связана ионом перманентно, третья приближена к структуре воды, а вторая, промежуточная, обладает переходной структурой, склонной к изменению периода своей подвижности.

Установлено, что положительной гидратацией обладают ионы  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$ , отрицательной –  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$  и  $\text{Cs}^+$ . В целом, наибольшее увеличение подвижности гидратных молекул воды наблюдается при радиусе иона 0.165 нм (таков ион  $\text{Cs}^+$ ). Дальнейшее увеличение радиуса начинает играть роль не разрушителя, а стабилизатора структуры воды: включается "эффект препятствия", и окружающие частицу молекулы воды теряют часть степеней свободы, замедляя движение.

С явлением гидратации связаны процессы распределения и перераспределения частиц взвешенных и/или растворенных в воде веществ, их коллективного или согласованного перемещения в растворах [4, 9]. Многие экспериментальные факты и результаты компьютерного моделирования указывают на то, что в водных растворах наблюдаются корреляции между движениями даже далеко отстоящих друг от друга частиц, сохраняющиеся в течение длительного времени, образование кластеров и цепочек из них.



**Рис. 9.** Концентрация трехвалентного (квадраты) и двухвалентного (треугольники) железа в р. Исеть, створ Решетка. Ежемесячные наблюдения за 18 месяцев – от мая 2009 г. (интервал 1) до октября 2010 г. (интервал 18). Часть результатов измерений взята из данных Уральского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, другая часть – по пробам, отобраным авторами и исследованным в аккредитованной лаборатории ОАО “Акваметрия” при участии Уральского центра стандартизации и метрологии “УРАЛТЕСТ”.

Эффекты структурирования (в разных случаях – перераспределения, разброса) частиц взвешенных и/или растворенных в воде веществ в природных водах “управляются” как при прямом, так и при опосредованном влиянии сетки водородных связей. Так, в течении Пуазейля наблюдается эффект совокупного смещения броуновских частиц [2]. Такое же перераспределение происходит в результате термофореза – движения частиц примеси из более нагретых областей в более холодные. При малых значениях числа Рейнольдса известен и турбофорез – направленное смещение частиц взвешенных и/или растворенных в воде веществ в сторону снижения интенсивности пульсаций. Термофорез приводит к накоплению частиц в области минимума температуры, а турбофорез, напротив, – к их смещению в зону пульсаций (турбулентности). Впрочем, в условиях преобладающего действия силы стокова трения возможно сглаживание этих эффектов [22].

Для более полного представления об эффектах перераспределения примеси в потоке воды необходимо также учитывать флуктуации параметров порядка, которые определяют сингулярные вклады колебательного и вращательного молекулярного движения в термодинамические характеристики вещества. Это обнаруживается особенно четко в окрестности фазовых переходов второго рода.

О том, что движение в жидкостях может быть результатом только коллективного или согласо-

ванного перемещения многих частиц, свидетельствуют результаты компьютерного моделирования и экспериментальные факты. Так, в реках, даже в отсутствие существенных источников и стоков примеси, наблюдается выраженный разброс концентрации частиц взвешенных и/или растворенных веществ. Из типичного примера, приведенного на рис. 9, видно, что временные ряды тесно взаимосвязанных концентраций двух- и трехвалентного железа часто меняются в противоположных направлениях (интервал 04 соответствует августу 2009 г., 11 – марту 2010 г. и др.). Вполне вероятно, что такие различия связаны с разным характером гидратации ионов или образований, включающих две формы железа. Что касается идеи “выравнивания концентрации”, то она справедлива только для неподвижной среды, а в потоках это явление невозможно, что следует из сингулярной природы гидродинамических уравнений [22]. И хотя нет универсальных ответов на вопросы о границах и масштабах применимости геометрии течения и самоорганизации воды в потоке, полезно обращаться к фактам – таким, как на рис. 9, а также приведенным в работе [22].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описания воды в терминах классической механики сплошной среды и в предположении “пассивности” примесей [13] недостаточно для адекватного моделирования природных водных

объектов, для полноценного исследования явлений фильтрации, диффузии и других технологически значимых процессов в воде, обуславливающих ее ресурсно-хозяйственные свойства, для понимания и прогнозирования разброса примеси в речных потоках. Развитие методов водохозяйственного управления и технологий водопользования требует учета следующих свойств пространственной сетки водородных связей воды [8]:

устойчивость – сопротивление воды кратковременным импульсам силы и снижение вязкости в присутствии достаточно больших однозарядных ионов благодаря ее способности передавать возмущения на весь объем;

лабильность – широкое распределение по углам и расстояниям водородной связи без ее разрыва, способность легко образовывать достаточно большие полости (полиморфизм твердой фазы воды также связан с этой особенностью сетки); в жидкости это свойство объясняет явление гидрофобной гидратации нейтральных или слабозаряженных частиц, приводящей к усилению водородных связей между молекулами растворителя;

упругость – стремление сетки к сохранению первоначальной конфигурации, способность выталкивать примеси к местам дефектов сетки и объединять их вместе, уменьшая гидрофобную поверхность и обуславливая микрорасслаивание водного раствора;

отрицательная гидратация, связанная с дефектообразованием в сетке Н-связей достаточно больших однозарядных ионов с преимущественно ион-дипольным взаимодействием с молекулами воды.

Система этих свойств определяет процессы микроструктурной самоорганизации в водных растворах, роль которых для формирования ресурсно-хозяйственных особенностей и качества природной воды остается недооцененной. Ниже перечислены обусловленные молекулярно-динамическими свойствами воды ее макрокопические характеристики, значимые для принятия водохозяйственных решений, обработки (подготовки, очистки и пр.) природных, сточных и технологических вод, для охраны и восстановления водных биоресурсов:

теплоемкость при плавлении льда возрастает более чем в два раза;

аномально велика теплота испарения воды (10.5 ккал/моль);

температурные зависимости плотности, теплоемкости, скорости ультразвука, изотермической сжимаемости проходят через экстремум: максимум плотности достигается при 4°C, минимум теплоемкости при постоянном давлении  $C_p$  – при 35°C, минимум изотермической сжимаемости – при 46°C;

аномальны зависимости от давления вязкости, диэлектрической проницаемости, коэффициента самодиффузии: с увеличением давления при температуре 0–30°C вязкость проходит через минимум, а коэффициент самодиффузии – через максимум.

Учет молекулярно-динамических свойств воды – одно из важных направлений развития методов водохозяйственного управления, решения целого ряда инновационных водохозяйственных и технологических задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аксенов В.И., Галкин Ю.А., Заслоновский В.Н. и др.* Промышленное водоснабжение: учебное пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 221 с.
2. *Бетяев С.К.* Гидродинамика: проблемы и парадоксы // УФН. 1995. Т. 165. Вып. 3. С. 299–330.
3. *Веселов Ю.С.* Эффект накопления перекиси водорода при обратнo-осмотическом опреснении морской воды // Химия и технология воды. 1991. Т. 13. № 8. С. 741–745.
4. *Волошин В.П., Желиговская Е.А., Маленков Г.Г. и др.* Структуры сеток водородных связей и динамика молекул воды в конденсированных водных системах // Рос. хим. журн. 2001. Т. XLV. № 3. С. 31–37.
5. *Гудков С.В., Иванов В.Е., Карп О.Э. и др.* Влияние биологически значимых анионов на образование активных форм кислорода в воде под действием неионизирующих физических факторов // Биофизика. 2014. Т. 59. Вып. 5. С. 862–870.
6. *Данилов-Данильян В.И.* Экономические проблемы управления водными ресурсами и водным хозяйством // Избранные труды института водных проблем РАН. Т. 2. М.: Курс, 2017. С. 429–453.
7. *Зацепина Г.Л.* Физические свойства и структура воды. М.: Изд-во МГУ, 1998. 185 с.
8. *Родникова М.Н.* Об упругости пространственной сетки водородных связей в жидкостях и растворах // Структурная самоорганизация в растворах и на границе фаз. М.: ЛКИ, 2008. С. 151–198.
9. *Родникова М.Н.* Особенности растворителей с пространственной сеткой Н-связей // Журн. физ. химии. 1993. Т. 67. № 2. С. 275–280.
10. *Розенталь О.М.* Структура и вмержание в лед гидратационных комплексов ионов // Журн. структурной химии. 1971. Т. 12. № 5. С. 917–919.
11. *Самойлов О.Я.* Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов. М.: Наука, 1957. 182 с.
12. *Справочник по гидрохимии / Под ред. А.М. Никанорова.* Л.: Гидрометеиздат, 1989. 391 с.
13. *Хубларян М.Г.* Водные потоки в различных средах. М.: ГЕОС, 2009. 484 с.
14. *Чашечкин Ю.Д., Розенталь О.М.* Физическая природа неоднородности состава речных вод // Докл. РАН. 2019. Т. 484. № 5. С. 83–86.
15. *Чумаевский Н.А., Родникова М.Н.* О пространственной сетке водородных связей // Докл. РАН. 1999. Т. 364. № 5. С. 640–649.

16. Шкинев В.М., Трофимов Д.А., Данилова Т.В. и др. Армированные трековые мембраны в методах оценки качества природной и питьевой воды // Журн. аналит. химии. 2008. Т. 63. № 4. С. 363–370.
17. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды / Пер. с англ. А.К. Шемелина; под ред. В.В. Богородского. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.
18. Anikeenko A.V., Malenkov G.G., Naberukhin Yu.I. Visualization of the collective vortex-like motion in liquid argon and water // The J. Chem. Phys. 2018. V. 148. P. 094508–092518.
19. Belan S., Fouxon I., Falkovich G. Localization-delocalization transitions in turbophoresis of inertial particles // Phys. Rev. Lett. 2014. March. № 112(23).
20. Buslaeva M.N., Samoilov O.Ya. // The Chemical Physics of Solvation. Pt A. Amsterdam: Elsevir, 1985. P. 391–414.
21. Cate M.G., Huskens J., Crego-Calama M. et al. Thermodynamic Stability of Hydrogen-Bonded Nanostructures: A Calorimetric Study // Chemistry – A European J. 2004. V. 10(15). P. 3632–3639.
22. Chashechkin Yu.D., Rozental O.M. River Flow Structure and Its Effect on Pollutant Distribution // Water Resour. 2019. V. 46. № 6. P. 910–918.
23. Debenedetti P.G. Supercooled and glassy water // J. Phys. Condens. Matter. 2003. V. 15. P. R1669.
24. Kononov L.O. Chemical reactivity and solution structure: on the way to a paradigm shift? // RSC Adv. 2015. V. 5. P. 46718–46734.
25. Lee J.K., Walker K.L., Han H.S. et al. Spontaneous generation of hydrogen peroxide from aqueous microdroplets // Proc. of the Nat. Acad. of Sci. 2019 [Электронный ресурс]. [https://www.researchgate.net/publication/335425749\\_Spontaneous\\_generation\\_of\\_hydrogen\\_peroxide\\_from\\_aqueous\\_microdroplets](https://www.researchgate.net/publication/335425749_Spontaneous_generation_of_hydrogen_peroxide_from_aqueous_microdroplets) (дата обращения: 19.08.2020)
26. Osmachko M.P., Morzhukhina S.V. The estimation of Volga River Quality in the Upper Basin // Int. Conf. on Rivers and Civilization. Multidisciplinary Perspectives on Major River Basins. Abstracts. La Crosse, Wisconsin, 2004. P. 131–132.
27. Pickup J. Environmental safety of halogenated by-products from use of active chlorine. Euro Chlor Science Dossier 15. Brussels, 2010. 210 p.
28. Scheeler M.W., van Rees W.M., Kedia H. et al. Complete measurement of helicity and its dynamics in vortex tubes // Sci. 2017. V. 357. Iss. 6350. P. 487–491.
29. Svard M., Devi R., Khamar D. et al. Solute clustering in undersaturated solutions – systematic dependence on time, temperature and concentration // Phys. Chem. Chem. Phys. 2018. V. 20. P. 15550–15559.

## УГЛЕВОДОРОДЫ В ВОДАХ И ДОННЫХ ОСАДКАХ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА<sup>1</sup>

© 2021 г. И. А. Немировская<sup>a</sup>, \* П. О. Завьялов<sup>a</sup>, А. В. Храмцова<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997 Россия

\*e-mail: nemir44@mail.ru

Поступила в редакцию 20.03.2020 г.

После доработки 17.06.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Приведены результаты изучения содержания и состава алифатических углеводородов во взвеси поверхностных вод и в поверхностном слое донных осадков в апреле и сентябре 2019 г. в Керченском проливе в сравнении с другими районами Черного моря. Несмотря на высокие концентрации алифатических углеводородов (особенно в водах самого пролива – 110–160 мкг/л и в песчаных осадках – 16–63 мкг/г), состав алканов не соответствовал нефтяному из-за быстрой трансформации нефтяных углеводородов. Загрязненность вод и осадков пролива проявлялась в повышенном содержании углеводородов в составе липидов и  $C_{орг}$ , в наличии нафтено-ароматических соединений в составе алканов, в доминировании фитана над пристаном.

*Ключевые слова:* нефтяное загрязнение, взвесь, донные осадки, алифатические углеводороды, Керченский пролив.

DOI: 10.31857/S0321059621020085

Керченский пролив – район с характерными трансграничными экономическими и экологическими проблемами. Его береговая часть характеризуется высокой плотностью населения и развитой городской и промышленной инфраструктурой. С другой стороны, это транспортный коридор между Азовским и Черным морями с последующим выходом в Средиземное море. Интенсификация судоходства, рейдовая перевалка грузов, функционирование портов и верфей, загрязнения с судов в процессе эксплуатации и при авариях, необходимость проведения дноуглубительных работ, которые сопровождаются дампингом изъятых грунтов, гидротехническое строительство, а также поступление углеводородов из грязевых вулканов влияют на биотические и абиотические элементы экосистемы пролива [2, 11, 17, 19]. Кроме того, эта акватория имеет рекреационное и рыбопромысловое значение [17]. В этом районе уже происходили серьезные нефтяные разливы [7, 12].

С целью изучения происхождения и уровней содержания углеводородов проведено изучение алифатических углеводородов (АУВ) в апреле и в сентябре 2019 г. во взвеси поверхностных вод и в донных осадках (ДО) в акватории Керченского

пролива в сравнении с другими районами Черного моря.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях использованы методы, принятые при анализе нефтяных и биогенных АУВ [5, 6, 16]. Отбор проб проводили пластиковыми батометрами (система Розетта) на гидрологических станциях. Взвесь для изучения органических соединений (ОС): липидов, АУВ,  $C_{орг}$ , хлорофилла “а” (хл а), – выделяли фильтрацией при 0.2 атм. на предварительно прокаленные при 450°C стекловолочные фильтры GF/F (0.7 мкм), а для изучения взвеси – на предварительно отмытые соляной кислотой и взвешенные ядерные фильтры диаметром 0.45 мкм.

Липиды (суммарная экстрагируемая фракция) выделяли метиленхлоридом на ультразвуковой бане “Сапфир” при температуре 30°C. Концентрацию липидов (до колоночной хроматографии на силикагеле) и АУВ (после колоночной хроматографии) определяли ИК-методом на спектрофотометре “IRAffinity-1” (фирма “Shumadzu”, Япония) по полосе 2930 см<sup>-1</sup>. В качестве стандарта использовали смесь (по объему): 37.5% изооктана, 37.5% гексадекана и 25% бензола (ГСО 7248-96, разработчик АОЗТ “Экрос”). Чувствительность метода – 4 мкг/мл экстракта [15, 16]. Этот метод

<sup>1</sup> Исследования проводили в рамках государственного задания (тема 0128-2019-0011), при поддержке РФФИ (проект 18-05-80049).

**Таблица 1.** Содержание органических соединений и взвеси в поверхностных водах в различных районах Черного моря

Год/месяц	АУВ, мкг/л		Липиды, мкг/л		хл <i>a</i> , мкг/л		Взвесь, мг/л	
	интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее
Керченский пролив								
2019 г., апрель	69–186	102	91–266	141	0.13–2.89	0.76	0.51–3.21	1.39
2019 г., сентябрь	55–138	93	95–213	159	0.13–1.55	0.46	0.32–3.48	0.99
Феодосийский залив								
2015 г., май	14–90	35	32–213	83	0.03–0.28	0.12	0.44–2.38	1.2
2016 г., май	16–179	64	54–300	131	0.21–0.45	0.32	0.38–1.57	0.90
2016 г., сентябрь	19–92	51	47–326	134	0.17–0.81	0.42	0.40–2.22	1.14
2017 г., май	11–29	18	59–125	87	0.13–0.26	0.20	0.28–1.10	0.66
Прибрежная акватория Крымского п-ова								
2018 г., декабрь	16–51	32	53–113	78	Не определяли	Не определяли	0.16–0.62	0.30
Большой Сочи								
2013 г., май	19–238	58	58–743	185	0.14–0.37	0.27	1.38–31.57	8.07
2014 г., май	4–675	49	9–876	120	0.25–2.46	1.05	1.16–8.69	3.16
2015 г., июнь	14–33	24	28–119	63	0.06–0.54	0.19	2.1–73.5	23.6
Район Туапсе								
2018 г., май–июнь	16–275	43	29–1136	142	Не определяли	Не определяли	0.47–16.2	1.48
Центральная часть Черного моря								
2015 г.	9–21	14	24–47	37	0.01–0.22	0.14	0.24–0.38	0.28

используется в качестве арбитражного при анализе нефтяных УВ [5, 6].

ДО отбирали дночерпателем, замораживали при  $-18^{\circ}\text{C}$ . Для анализа в стационарной лаборатории пробы размораживали, сушили при температуре  $50^{\circ}\text{C}$ , определяя влажность ДО. Из высушенных проб после растирания отсеивали фракцию 0.25 мм и экстрагировали липиды так же, как из взвеси, и также определяли АУВ ИК-методом.

Для анализа алканов из фракции АУВ, выделенной методом колоночной хроматографии гексаном, использовали отечественный хроматограф “Кристалл-Люкс 4000-М”, оснащенный пламенно-ионизационным детектором (ПИД), с капиллярной колонкой 30 м  $\times$  0.22 мм фирмы “Supelco” с фазой – 5% фенила и 95% метилполисилоксана при программировании температуры от 60 до  $300^{\circ}\text{C}$ , со скоростью  $8^{\circ}/\text{мин}$ , газ-носитель – гелий (скорость прохождения газа 1.5 мл/мин). Для калибровки прибора и определения времени выхода идентифицируемых алканов использовали смесь калибровочных стандартов  $n\text{-C}_{10}\text{-C}_{40}$  фирмы “Supelco”, а в качестве внутреннего стандарта – сквалан фирмы “Sigma Aldrich”. Расчет

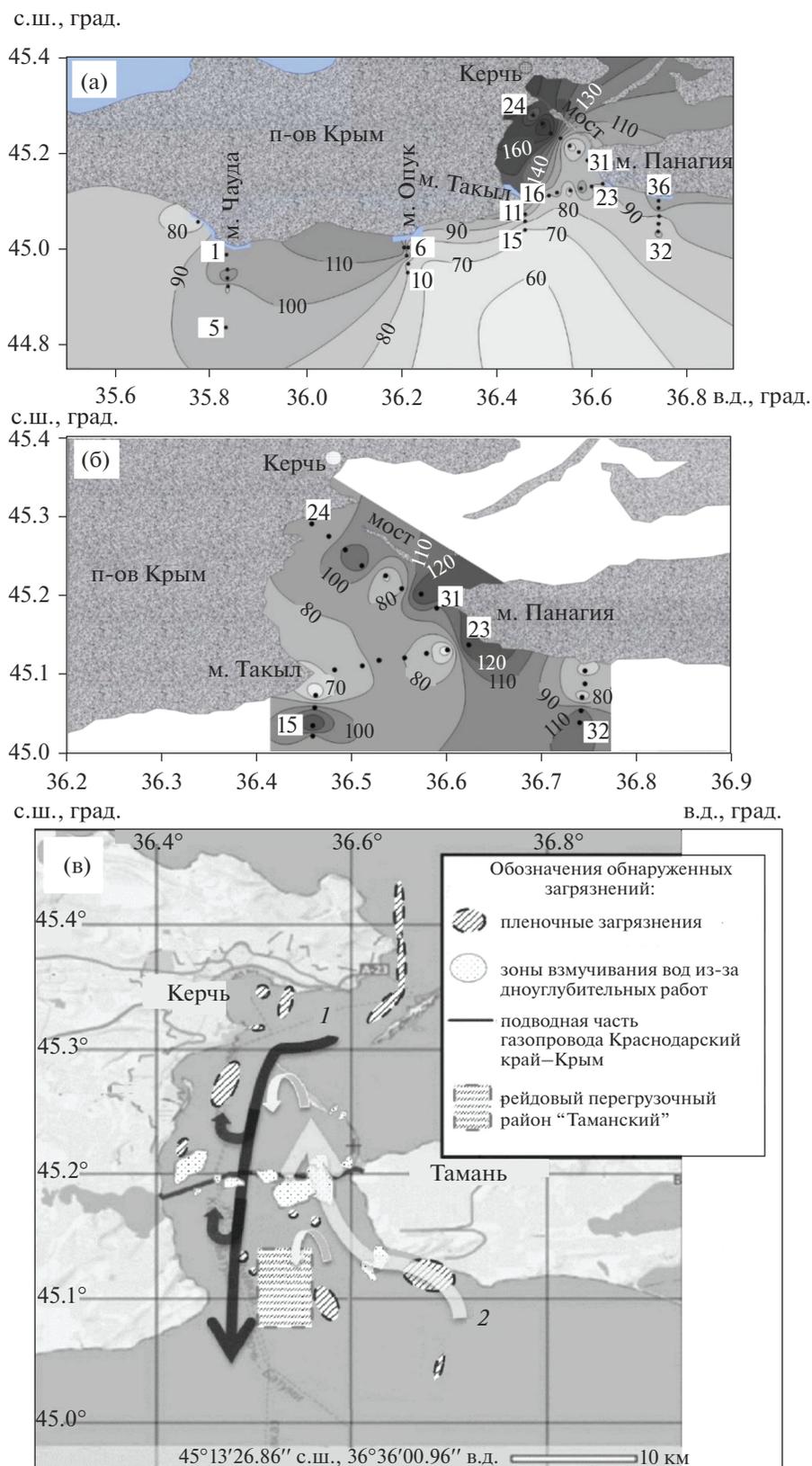
проводили с помощью программного обеспечения Netchrom V2.1.

$S_{\text{орг}}$  в пробах взвесей и ДО определяли методом сухого сжигания на отечественном анализаторе “АН-7560”, помещая фильтр (или его часть) или навеску осадка в специальный фарфоровый тигель. Чувствительность метода – 6 мкг углерода в пробе, точность – 3–6 относительных процентов. Для пересчета концентраций УВ в  $S_{\text{орг}}$  осадка использовали коэффициент 0.86.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По полученным в апреле 2019 г. данным установлены более высокие концентрации АУВ в поверхностных водах непосредственно в Керченском проливе по сравнению с Феодосийским заливом (рис. 1а). При среднем содержании 102 мкг/л (табл. 1) в Феодосийском заливе концентрации АУВ менялись в интервале 70–110 мкг/л, а в Керченском проливе – 110–160 мкг/л.

Повышенная доля (в среднем 72%) АУВ в составе липидов может косвенно указывать на влияние нефтяных АУВ. Относительное увеличение



**Рис. 1.** Распределение АУВ во взвеси поверхностных вод в апреле (а), в сентябре (б) 2019 г. и схема течений (в) в акватории Керченского пролива по данным [3].

их концентраций в составе липидов происходит при поступлении нефтепродуктов [15], и в незагрязненных районах в центральной части моря доля АУВ  $\leq 38\%$  [16].

В сентябре 2019 г. исследования охватывали акваторию Керченского предпролива: были сделаны разрезы от мысов Такыл и Панагия к берегу и в самом проливе (рис. 1б). Несмотря на некоторое снижение концентраций АУВ (табл. 1), их величины оставались довольно высокими. Даже при наиболее низком содержании на станциях 12 (56 мкг/л) и 22 (55 мкг/л) они превышали ПДК для нефтяных УВ (50 мкг/л).

Изучение динамики движения водных масс в самом Керченском проливе показало “классический” тип водообмена между двумя бассейнами с разной плотностью вод. Здесь наблюдается разнонаправленный двухслойный поток, когда более легкая вода образует течение на поверхности, в то время как более тяжелая движется в противоположном направлении в придонном слое. В Керченском проливе такие ситуации тоже наблюдаются (рис. 1в). Проведенное авторами численное моделирование установило, что ~47% времени в году течение через пролив движется из Азовского в Черное море, а из Черного в Азовское море ~41% времени, в 12% случаев течения в западной и восточной частях пролива — противоположного направления.

Концентрации алканов в большинстве проб из района Керченского пролива оказались довольно малыми, колебались в интервале 0.19–1.05 мкг/л, что составляет всего 0.4–0.7% АУВ.

Конфигурация хроматограмм алканов и распределение молекулярных маркеров (табл. 2) указывали на различный их состав во взвеси поверхностных вод. Их состав не соответствовал нефтяному (рис. 2), для них характерно плавное распределение гомологов. Отношение нечетных алканов к четным (СР1) незначительно  $>1$ , что типично для алканов взвеси [15, 23].

В некоторых пробах взвеси распределение алканов было бимодальным (рис. 2а) с максимумами в низко- и высокомолекулярных областях, что характерно для вод Азовского и Черного морей [18]. В низкомолекулярной области доминировали либо четные алканы  $n-C_{16}$ ,  $-C_{18}$ ,  $-C_{22}$ , повышенные концентрации которых возникают при микробной трансформации УВ [18, 20, 22], либо  $n-C_{17}$ , указывающий на включение алканов фито- и зоопланктона [20]. В высокомолекулярной области преобладала серия нечетных алканов  $n-C_{25}-C_{33}$  с максимумом при  $n-C_{31}$ . Нечетные алканы, как более устойчивые, чем четные, избирательно сохраняются в седиментационных процессах и характеризуют аллохтонные АУВ [15, 21, 24, 25]. Поэтому отношение низкомолекулярных алканов к высокомолекулярным:  $(\Sigma(C_{12-24})/\Sigma(C_{25-37}))$

менялось в широком диапазоне — 0.24–1.78 (табл. 2). Кроме того, наличие нафтено-ароматического “горба”, неразрешенного в газовой хроматографии соединений (отношение “горб”/алканы менялось незначительно — от 0.2 до 0.3), на всех хроматограммах, также может свидетельствовать о высокой степени трансформации АУВ.

Отношение пристан/фитан  $Pg/Pf$  во взвеси менялось в основном в интервале 0.14–0.85.  $Pg$  образуется преимущественно в природных процессах из фитола водорослей, а в нефтях — выше доля  $Pf$  [20]. Поэтому доминирование  $Pf$  над  $Pg$  среди изо-соединений может указывать на влияние нефтяных АУВ. Увеличение микробиальной активности в летний период приводит к уменьшению автохтонных низкомолекулярных АУВ. Поэтому в сентябре во взвеси поверхностных вод преобладали в основном высокомолекулярные алканы (рис. 2б).

Поверхностный слой ДО Керченского пролива характеризуется литологическим разнообразием [17, 19]. В прибрежной довольно узкой мелководной полосе пролива дно занято сложным комплексом песчаных, ракушечных и галечных отложений. Ракушечные поля приурочены в основном к прибрежной полосе. Непосредственно прилегающие к берегам Керченского полуострова участки дна сложены песками, которые распространяются до глубин 3–5 м [17]. В южной части Керченского пролива ДО в основном крупнозернистые. Поэтому концентрации  $C_{орг}$  и АУВ в ДО были малыми и составили в среднем 0.49% и 21 мкг/г (апрель) и 0.63% и 38 мкг/г (сентябрь) (табл. 3).

Гранулометрический тип ДО оказывает основное влияние на концентрации ОС, так как наблюдалась связь распределения  $C_{орг}$  и их влажности ( $r = 0.86$ ). Несмотря на различные источники АУВ, также наблюдались связи между распределениями  $C_{орг}$  и АУВ, и значения  $r$  в осадках, отобранных в разные сезоны, составили соответственно 0.79 и 0.85. Обусловлено это быстрой трансформацией АУВ. Необходимо отметить, что подобные зависимости в распределении УВ и  $C_{орг}$  наблюдались в ДО даже во время половодья в рукавах устьевой области Северной Двины ( $r_{АУВ-C_{орг}} = 0.81$ ), несмотря на поступление в воды реки в этот период большого количество взвесей и сорбированных ими различных загрязняющих веществ. Последнее может свидетельствовать не только о быстрой утилизации нефтяных УВ, но также об одинаковых путях поступления природных и антропогенных соединений в ДО.

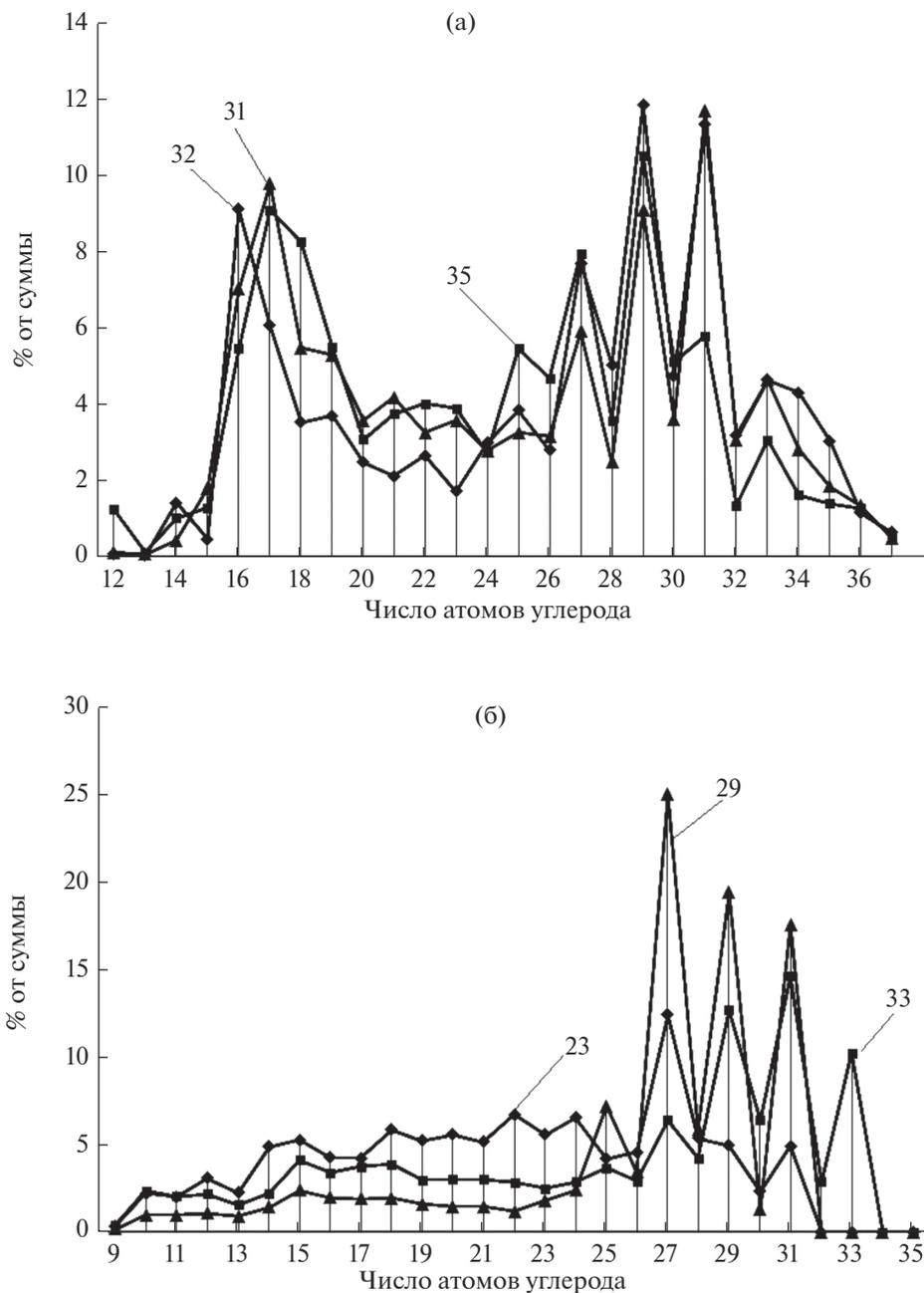
Наиболее высокие концентрации АУВ наблюдались в ДО, как и в воде, непосредственно в Керченском проливе (рис. 3). Здесь в сентябре увеличивалась доля АУВ (1.2–2.4%) в составе  $C_{орг}$ . Напротив, в апрельской съемке только в ДО на

Таблица 2. Молекулярные маркеры в составе алканов взвеси и ДО

Станция	АУВ*, мкг/л	Алканы	Пристан Фитан	СРІ ( $\Sigma_{нч}/\Sigma_{ч}$ )	$\frac{\Sigma(C_{12-24})}{\Sigma(C_{25-37})}$	Доминирующие пики
Взвесь, апрель						
1	132	0.60	0.14	1.69	0.39	Нечетные C <sub>25</sub> –C <sub>33</sub>
5	134	0.90	0.28	1.30	0.67	C <sub>18</sub> , C <sub>24</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub>
6	143	0.63	0.33	1.37	0.52	C <sub>23</sub> , C <sub>31</sub> , C <sub>33</sub>
10	115	0.45	0.19	0.81	1.10	C <sub>17</sub> , C <sub>22</sub> , C <sub>24</sub> , C <sub>30</sub>
11	90	0.44	0.45	1.37	0.68	C <sub>18</sub> , Нечетные C <sub>25</sub> –C <sub>33</sub>
14	259	0.50	0.26	1.32	0.53	C <sub>18</sub> , C <sub>26</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
15	220	1.05	0.37	1.17	0.80	C <sub>18</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>29</sub>
16	164	0.57	0.19	1.28	0.48	C <sub>18</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub>
19	126	0.91	0.34	2.22	0.24	C <sub>25</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
23	151	0.96	0.20	1.34	0.30	C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>33</sub>
24	132	0.48	0.38	1.63	0.45	C <sub>17</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
27	113	0.39	0.31	1.32	1.31	C <sub>16</sub> , C <sub>17</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
31	111	0.43	0.29	1.54	0.91	C <sub>17</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
32	120	0.33	0.24	1.31	0.57	C <sub>16</sub> , C <sub>27</sub> –C <sub>31</sub>
35	190	0.19	0.18	1.36	0.96	C <sub>17</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub>
Взвесь, сентябрь						
14	136	0.36	0.34	1.31	1.70	C <sub>19</sub> , C <sub>23</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>27</sub>
23	142	1.07	0.32	1.09	1.78	C <sub>19</sub> , C <sub>27</sub>
29	81	0.74	0.65	3.47	0.30	Нечетные C <sub>25</sub> –C <sub>31</sub>
33	111	0.84	0.85	1.72	0.67	Нечетные C <sub>25</sub> –C <sub>29</sub>
Осадки, апрель						
1	18	0.23	2.67	2.02	0.50	C <sub>23</sub> , Нечетные C <sub>25</sub> –C <sub>31</sub>
17 (0–0.5)**	29	1.62	0.64	2.46	0.80	C <sub>17</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>27</sub>
17 (0.5–3)	20	1.25	0.75	2.62	0.70	C <sub>21</sub> , C <sub>23</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
23	15	6.91	0.30	1.72	1.29	C <sub>17</sub> , C <sub>19</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>27</sub>
27	2919.2	0.14	0.28	2.89	1.17	C <sub>19</sub> , C <sub>21</sub> , C <sub>23</sub> , C <sub>31</sub>
33	5	0.66	0.51	2.63	0.52	C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
19 (0–0.5)	20	0.52	0.53	3.33	0.52	C <sub>17</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
19 (0.5–3)	19	0.47	0.46	3.24	0.39	C <sub>17</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
7	40	1.23	0.85	3.06	0.33	C <sub>23</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
22	42	1.13	0.26	2.43	1.11	C <sub>17</sub> , C <sub>21</sub> , C <sub>31</sub>
24в	50	1.75	0.93	3.09	0.45	C <sub>17</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
24н	36	2.64	0.41	3.76	0.53	C <sub>17</sub> , C <sub>21</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
Осадки, сентябрь						
3 (0–0.5)	40	0.66	0.70	2.22	0.99	C <sub>17</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>31</sub>
3 (0.5–3)	26	0.45	0.69	3.23	0.56	C <sub>17</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>31</sub> , C <sub>33</sub>
17 (0–0.5)	63.19	4.27	0.99	4.98	1.00	C <sub>17</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
17 (0.5–3)	43.35	1.61	0.92	4.58	0.94	C <sub>17</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>31</sub>
19 (0–0.5)	35.45	2.29	1.01	4.21	0.74	C <sub>17</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
19 (0.5–3)	30.08	0.95	0.64	3.02	0.41	C <sub>17</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub> , C <sub>33</sub>
36	25.90	0.82	0.90	3.12	0.31	C <sub>17</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
20	45.10	2.47	0.41	4.55	0.28	C <sub>17</sub> , C <sub>31</sub> , C <sub>33</sub>
1	18.45	2.33	0.60	1.62	0.72	C <sub>17</sub> , C <sub>25</sub> , C <sub>29</sub> , C <sub>31</sub>
2	15.81	0.34	0.31	3.68	1.26	C <sub>17</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>31</sub>

\* Концентрация во взвеси – мкг/л, в осадках – мкг/г.

\*\* 0–0.5 см – поверхностный окисленный, 0.5–3 см – подповерхностный восстановленный слой ДО; на станциях, где не указан интервал, поверхностный слой осадков был однородным – 0–3 см.



**Рис. 2.** Состав алканов во взвеси поверхностных вод на станциях 31, 32, 35 в апреле (а) и на станциях 23, 29, 33 в сентябре (б) 2019 г. Местоположение станций приведено на рис. 1.

прибрежных станциях возле мысов Опук и Чауда концентрации АУВ в составе  $C_{орг}$  достигали 2.9–4.2%. В ДО остальных станций содержание АУВ  $\leq 0.78\%$ .

Концентрации (в среднем 1.54–1.62 мкг/г) алканов в ДО были выше, чем во взвеси поверхностных вод. В их составе в большинстве проб доминировали высокомолекулярные гомологи (рис. 4а, 4б), так как в основном  $(\Sigma(C_{12-24})/\Sigma(C_{25-37})) < 1$ . Транс-

формация алканов в толще воды приводит к тому, что значения СРІ в ДО выше, чем во взвеси, и в среднем изменялись от 2.8 (апрель) до 3.5 (сентябрь). По этой же причине средние величины отношения Pг/Pф были больше, чем в поверхностных водах, и составили 0.53 (апрель) и 1.57 (сентябрь).

При переходе от верхнего окисленного слоя (0–0.5 см) к восстановленному (0.5–3 см) со-

Таблица 3. Содержание органических соединений в ДО

Год, месяц	n	АУВ, мкг/г		C <sub>орг</sub> , %		АУВ, % C <sub>орг</sub>	
		интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее
Керченский пролив							
2019, апрель	17	1–50	21	0.02–1.34	0.49	0.35–4.25	0.90
2019, сентябрь	11	16–63	38	0.12–1.43	0.63	0.33–2.44	0.80
Феодосийский залив							
2015, май	9	17–80	33	0.39–1.16	0.88	0.17–0.73	0.35
2016, май	16	3–95	35	0.18–1.30	0.92	0.11–0.63	0.31
2017, май	18	9–31	26	0.42–1.22	0.73	0.14–0.50	0.30
Район Туапсе							
2018, июнь	13	5–316	67	0.038–0.372	0.169	0.29–14.20	2.88
Прибрежная акватория Крымского п-ва							
2017, декабрь	5	36–64	47	1.10–4.40	3.10	0.09–0.28	0.17
2018, декабрь	10	27–147	56	0.23–2.06	0.23	0.17–1.07	0.45

держание АУВ, как и C<sub>орг</sub>, уменьшалось, что соответствует обычному распределению этих соединений в толще ДО [15].

Трансформация АУВ приводит к росту содержания высокомолекулярных нечетных алканов и к уменьшению количества легких гомологов, особенно n-C<sub>17</sub> (рис. 4в, 4г).

Таким образом, согласно полученным концентрациям, акваторию Керченского пролива можно отнести к “горячим точкам” в прибрежных водах РФ, так как содержание АУВ оказалось здесь более высоким по сравнению с другими районами Черного моря (табл. 1). В 2016 г. пленки нефтепродуктов были зафиксированы с помощью французских спутников SPOT-6 и SPOT-7 в районе фарватера и главного судоходного канала (рис. 1в) [3]. Кроме того, при анализе результатов спутникового мониторинга у побережья п-ова Крым (восточная часть Черного моря в 13 км от м. Карангат и в 16.5 км от м. Опук) на поверхности были обнаружены пятна-слики, проинтерпретированные как естественные нефтепроявления подводных грязевых вулканов [19]. Однако количественно оценить этот источник поступления АУВ довольно сложно, так как величина потоков непрерывно меняется. В зависимо-

сти от условий в геологических структурах под морским дном сипы могут активизироваться, на время прекращать свою активность либо вовсе исчезать, а затем появляться вновь [19]. Предполагается существование нескольких типов систем, в которых может происходить высачивание АУВ из толщи осадков. Обычно высачивается нефть с низкой температурой застывания, и в ее составе обнаружены биогенные АУВ. Представляется возможным существование природной дистилляции (фракционирования) АУВ, при которой низкомолекулярные компоненты выносятся в придонную воду, а на горизонтах ДО с резким изменением Eh, как это наблюдается в осадочной толще в районе флюидов, происходит избирательное накопление высокомолекулярных алканов.

Мониторинг состояния морских вод Керченского пролива на разрезах между портами Крым и Кавказ в 2014–2015 гг. фиксировал ежемесячное превышение ПДК (до 28 ПДК) в 47–49% общего количества определений [5]. В 2018 г. превышение ПДК по концентрациям АУВ также наблюдали ежемесячно [6]. Причем доля повторяемости концентраций АУВ, равных и превышающих ПДК, в общем количестве определений возросла с 38 (2017 г.) до 74% (2018 г.) [6]. Максимальное за-

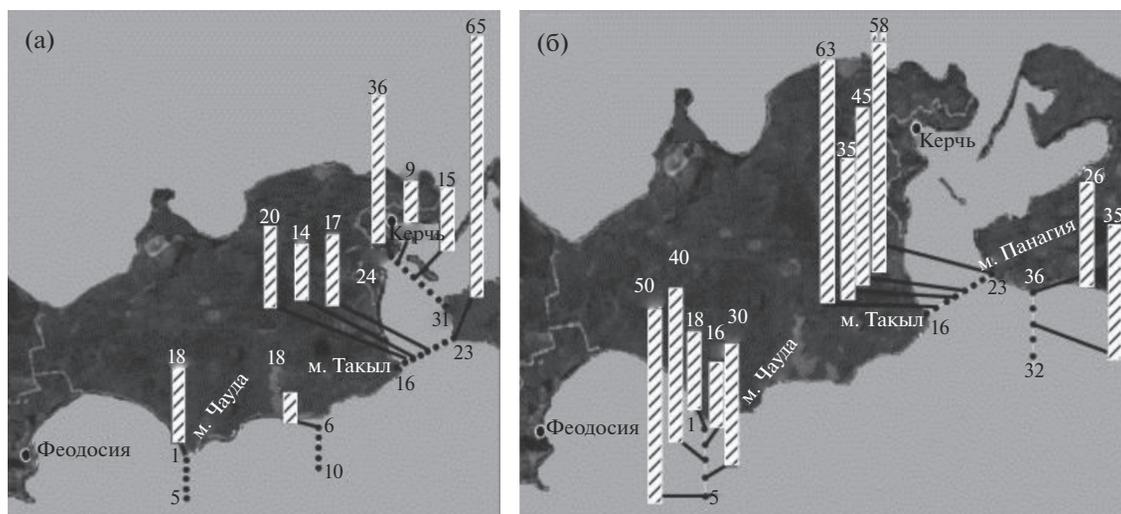


Рис. 3. Распределение в поверхностном слое ДО концентраций АУВ (столбцы и цифры над столбцами), мкг/г, в апреле (а) и в сентябре (б) 2019 г. Под столбцами – номера станций.

грязнение, превышавшее ПДК в 15–16 раз, фиксировалось в июне и августе. Среднемесячное содержание АУВ менялось от 60 до 300 мкг/л (6 ПДК), а среднее за период наблюдений достигло 160 мкг/л ( $>3$  ПДК). Если в 2017 г. индекс загрязненности вод (ИЗВ) был равным 0.46 и воды пролива были относительно чистыми, относились ко II классу – “чистым водам”, то в 2018 г. значение ИЗВ выросло до 1.16, что соответствовало III классу – “умеренно загрязненным водам”. Качество вод Керченского пролива в 2018 г. существенно ухудшилось в основном за счет многократного увеличения содержания в воде нефтяных АУВ [6].

Согласно данным авторов статьи, наиболее высокая величина АУВ установлена в районе Феодосии в мае 2016 г. – 64 мкг/л, а минимальная – в мае 2017 г. – 18 мкг/л (табл. 1). Даже в поверхностных водах в районе п. Туапсе в мае 2018 г. содержание АУВ изменилось с 16 до 49 мкг/л (в среднем 29 мкг/л), и только в самой р. Туапсе при концентрации взвеси 16.2 мг/л концентрация АУВ достигала 275 мкг/л.

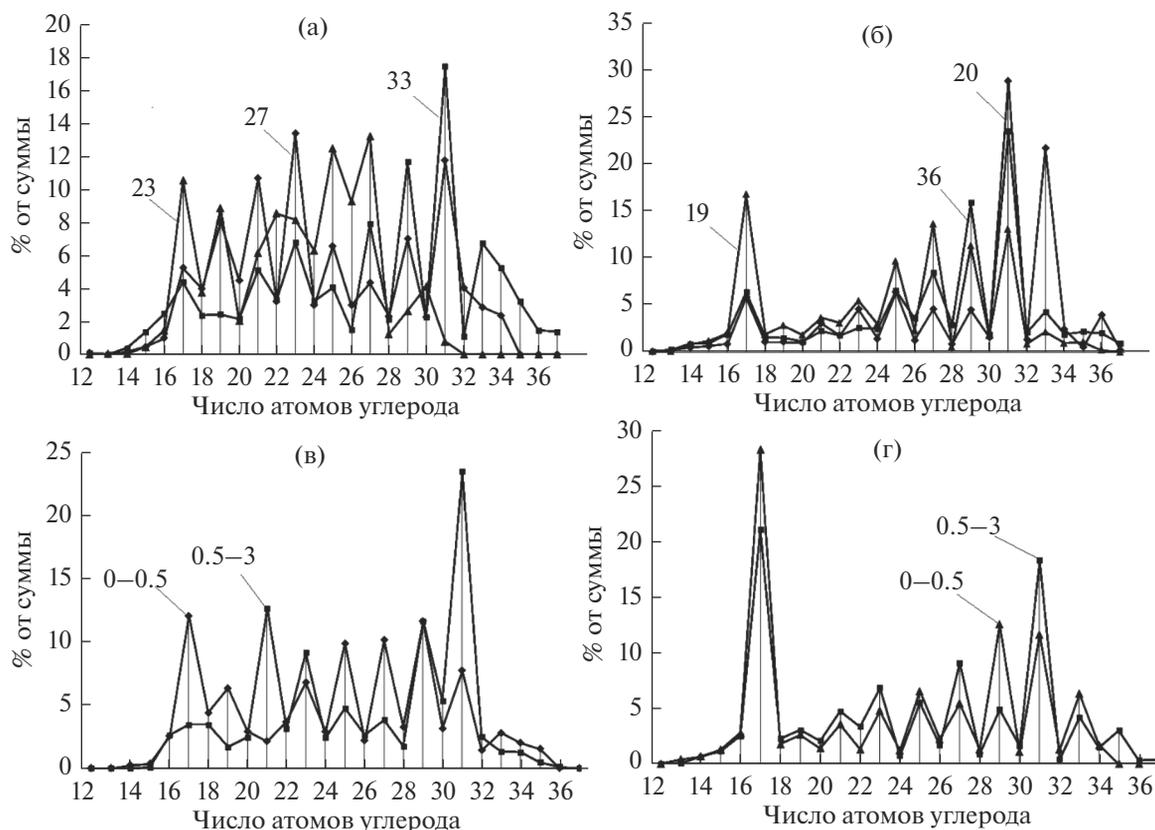
В 2019 г. во взвеси поверхностных вод содержание АУВ оставалось достаточно высоким. При этом количество минеральной взвеси к сентябрю 2019 г. уменьшилось на 30%, а концентрации хл  $a$  – на 40%, в то же время содержание  $S_{орг}$  во взвеси оставалось практически неизменным [16]. Такое поведение  $S_{орг}$ , АУВ и взвеси возможно только при постоянном поступлении ОС, скорее всего, с нефтяным загрязнением. В этом районе не произошло уменьшения загрязняющих веществ, как наблюдалось в акватории Большого Сочи после окончания строительства олимпийских объектов

[16]. В линзах загрязненной воды из Керченского пролива обычно повышено содержание растворенного органического вещества, нефтепродуктов и взвеси [10]. Все это способствовало увеличению взвеси и концентраций АУВ во взвеси в данной акватории.

При небольших глубинах сорбция загрязнений приводит к тому, что песчанистые ДО содержат АУВ в высоких концентрациях как в пересчете на сухую массу, так и в составе  $S_{орг}$ . Их величины выше фоновых значений (табл. 3), которые в песках составляют 10, а в илах 50 мкг/г [5, 24]. Считается, что в акватории у Керченского полуострова в судоходной части пролива даже содержание  $S_{орг}$  в ДО превышает в 1.5–2 раза значения, полученные в 1970-х гг. [17]. Это объясняется изменением условий осадконакопления под влиянием антропогенных факторов. Увеличение содержания  $S_{орг}$  в ДО приводит к появлению зон гипоксии и аноксии, образованию сероводорода в иловых ДО в придонных слоях вод и повышению риска заморных явлений [17].

Необходимо отметить, что и в другой “горячей точке” прибрежных вод РФ в Черном море – в акватории п. Туапсе в районе порта содержание АУВ в ДО достигало 356 мкг/г, а в составе  $S_{орг}$  – 14.2% (табл. 3), т.е. даже выше, чем в Керченском проливе.

Особенности циркуляции вод и неоднородность полей скорости в поперечном сечении Керченского пролива приводят к аккумулярованию нефтяных загрязняющих веществ в западной части у м. Такыл [4]. Этому способствуют также проводившиеся дноуглубительные работы, дам-



**Рис. 4.** Состав алканов ДО на станциях 23, 27 и 33 в апреле (а) и на станциях 19, 20 и 36 в сентябре (б) и изменения в их составе при переходе от окисленного слоя (0–0.5 см) к восстановленному (0.5–3.0 см) на ст. 17 в апреле (в) и в сентябре (г) 2019 г.

пинг грунтов и интенсивное судоходство (рис. 1в). В восточной части пролива, примыкающей к Таманскому полуострову, эти особенности в значительной мере определяются естественной спецификой океанологического режима акватории и процессами седиментации [17]. Направление течения определяется ветровым воздействием в данный и предшествующий промежутки времени и наклоном поверхности воды в проливе, т.е. разностью уровней водной поверхности двух морей. Загрязнения из района Керченского пролива могут вовлекаться в Основное Черноморское течение и переноситься по всему круговороту в течение 5–7 мес.

В морских водах происходит быстрая утилизация ОС [1, 8], особенно нефтяных АУВ [15]. Потери компонентов нефти за счет испарения пленки зависят от их состава и для легких нефтепродуктов оцениваются в 75, средних – 50 и тяжелых – 5–10% первоначальному составу [13]. Одновременно с испарением и изменением компонентного состава происходит химическая и биологическая трансформация нефтяных АУВ.

Только в Севастопольской бухте через бактериальное сообщество морской воды трансформируется 4.4, а в ДО – 0.02 т нефти в год [14]. Потенциально зоопланктонное сообщество бухты может накапливать и переносить 15 т нефти в сутки. Эти процессы приводят к тому, что состав алканов даже в поверхностных водах не соответствует нефтяному. Среди низкомолекулярных алканов доминировали автохтонные гомологи. Интенсивность бактериальной трансформации увеличивается с ростом температуры воды, поэтому во время сентябрьской съемки в поверхностных водах наблюдался рост четных низкомолекулярных гомологов (табл. 2). Утилизация автохтонных алканов в процессе седиментации приводит к росту в ДО терригенных нечетных соединений  $C_{25}$ – $C_{31}$ , что типично для ДО не только Черного моря [18], но и других акваторий Мирового океана и даже арктических морей [15]. Маркеры указывали на смешанный состав АУВ, среди которых доминировали как алканы фитопланктона, так и терригенные гомологи (рис. 4).

## ВЫВОДЫ

Акваторию, примыкающую к Керченскому проливу, можно отнести к “горячим точкам” в водах РФ, так как она характеризуется высокими концентрациями АУВ во взвеси поверхностных вод (110–160 мкг/л) и в песчаных ДО (16–63 мкг/г).

Постоянное поступление загрязняющих веществ приводит к тому, что в этом районе не происходит уменьшения концентраций АУВ в водах и ДО, как наблюдалось в акватории Большого Сочи после окончания строительства олимпийских объектов [16].

Аккумуляция АУВ происходит не только в ДО разреза, пересекающего Керченский пролив, но и у мысов Чауда и Такыл, что обусловлено особенностями течений в этом районе.

Нефтяные АУВ деградируют настолько быстро, что состав алканов даже в поверхностных водах не соответствует нефтяному. Поэтому во взвеси поверхностных вод в низкомолекулярной области доминировали либо четные микробальные алканы, либо алканы фитопланктона. Влияние нефтяных алканов проявлялось в наличии нафтено-ароматических соединений и в доминировании фитана над пристаном. В процессе седиментации количество автохтонных алканов уменьшалось, поэтому в ДО преобладали высокомолекулярные нечетные гомологи, роль которых возрастала при переходе от окисленного слоя к восстановленному.

Авторы признательны сотрудникам ИО РАН: А.Б. Грабовскому, Б.В. Коновалову и П.В. Хлебопашеву за помощь в отборе проб, Г.И. Сычковой – за помощь в проведении анализов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агатова А.И.* Биохимические подходы к оценке продуктивности вод Мирового океана // Тр. ВНИРО. 2014. 152. С. 15–40.
2. *Еремеев В.Н., Иванов В.А., Ильин Ю.П.* Океанологические условия и экологические проблемы Керченского пролива // Морской экол. журн. 2003. Т. 2. № 3. С. 27–39.
3. *Иванов А.Ю., Кучейко А.А., Филимонова Н.А., Кучейко А.Ю., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В., Ускова А.А.* Пространственно-временное распределение пленочных загрязнений в Черном и Каспийском морях по данным космической радиолокации: сравнительный анализ // Иссл. Земли из космоса. 2017. № 2. С. 13–25.
4. *Ижицкий А.С., Завьялов П.О.* Гидрофизическое состояние вод Феодосийского залива в мае 2015 г. // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 538–545.
5. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2015 / Под ред. *А.Н. Коршенко*. М.: Наука, 2016. 184 с.
6. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2018 / Под ред. *А.Н. Коршенко*. М.: Наука, 2019. 190 с.
7. Керченская авария: последствия для водных экосистем. Ростов-на-Дону: АЗНИИРХ, 2008. 232 с.
8. *Кушнир В.М., Поважный В.В., Бердников С.В.* Минеральная и органическая компоненты взвеси по данным космических съемок и непосредственных измерений в Азовском море и Керченском проливе // Морской гидрофиз. журн. 2014. № 2. С. 22–31.
9. *Ларин А.А., Павленко Л.Ф., Скрыпник Г.В., Корпакова И.Г.* Загрязнение прибрежной акватории российского Причерноморья нефтяными компонентами // Морский экологический журн. 2011. Отд. вып. 2. С. 49–55.
10. *Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О.* Природные и антропогенные изменения в полях важнейших абиотических элементов экологического комплекса Керченского пролива в течение двух последних десятилетий. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2010. 118 с.
11. *Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Поле концентрации растворенного органического вещества в Азовском море и Керченском проливе на базе оптических наблюдений // Морской гидрофиз. журн. 2016. № 5. С. 76–88.
12. *Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И., Савицкий Р.М.* Воздействие на среду и биоту аварийного разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 3. С. 259–273.
13. *Миронов О.Г.* Взаимодействие морских организмов с нефтяными углеводородами. Л.: Гидрометеозидат, 1985. 176 с.
14. *Миронов О.Г., Миронов О.А., Муравьева И.П.* Нефтяные углеводороды в микроперифитоне при низких уровнях нефтяного загрязнения морской воды // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 12. С. 13–16.
15. *Немировская И.А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Науч. мир, 2013. 432 с.
16. *Немировская И.А., Завьялов П.О., Коновалов Б.В., Храмова А.В.* Содержание и состав углеводородов в воде и осадках в районе Керченского пролива // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 118–123.
17. *Овсяный Е.И., Коновалов С.К., Митропольский А.Ю., Контельянец Е.А.* Органический углерод и карбонатность современных донных отложений Керченского пролива // Геохимия. 2015. № 12. С. 1120–1131.
18. *Темердашев З.А., Павленко Л.Ф., Корпакова И.Г., Ермакова Я.С., Экилик В.С.* Генезис углеводородов в воде и донных отложениях Азовского и Черного морей // Экол. химия. 2017. Т. 26. № 2. С. 101–108.
19. *Шнюков Е.Ф., Пасынков А.А., Любичский А.А., Иноземцев Ю.И., Рыбак Е.Н., Кузнецов А.С.* Грязевые вулканы на Прикерченском участке шельфа и материкового склона Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 3. С. 28–36.
20. *Corner E.D.* Pollution studies with marine plankton. Pt 1 // Adv. Mar. Biol. 1978. V. 15. P. 289–380.

21. *Nishumura M., Baker E.W.* Possible origin of n-alkanes with remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1986. V. 50. № 2. P. 299–305.
22. *Readman J.W., Fillmann G., Tolosa I. et al.* Petroleum and PAH contamination of the Black Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 2002. 44. Iss. 1. P. 48–62.
23. *Saliot A., Goutx M., Fefrier A. et al.* Organic sedimentation in the water column in the Arabian Sea; relationship between the lipid composition of small and large-size, surface and deep particle // *Mar. Chem.* 1982. V. 11. № 3. P. 257–278.
24. *Tolosa I., De Mora S., Sheikholeslami M.R. et al.* Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // *Mar. Pollut. Bull.* 2004. V. 48. № 1–2. P. 44–60.
25. *Wakeham S.G.* Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in Black Sea // *Mar. Chem.* 1996. V. 53. № 2. P. 187–205.

## ФАКТОРЫ И ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ СОЛЕНОГО ОЗЕРА НА БЕРЕГУ БАЙКАЛА<sup>1</sup>

© 2021 г. А. М. Плюснин<sup>а</sup>, А. В. Украинцев<sup>а</sup>, \*, М. К. Чернявский<sup>а</sup>,  
Е. Г. Перязева<sup>а</sup>, Н. А. Ангахаева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, 670047 Россия

\*e-mail: ukraintsev87@bk.ru

Поступила в редакцию 13.04.2020 г.

После доработки 23.06.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Рассмотрены условия, в которых формируются ресурсы и химический состав воды минерального оз. Бормашового, расположенного на п-ове Святой Нос на восточном побережье оз. Байкал. Представлены результаты исследования воды и свободного газа, выделяющегося из донных отложений источников и озер п-ова Святой Нос. Приведены результаты анализа проб воды, отобранных в безледный и ледовый периоды и исследованных на широкий круг химических элементов современными методами. Рассмотрены геологические условия, сложившиеся в исследуемом районе. Установлено, что породы в районе озера представлены элювиальными отложениями, образовавшимися при интенсивном физическом и в меньшей степени химическом выветривании гранитов. Показано, что питание озера происходит в основном за счет разгрузки трещинно-жильных и грунтовых вод, которые придают озерным водам специфический геохимический облик. В зимний период в результате разложения органических остатков донных отложений в озерной воде меняются физико-химические условия, возрастает содержание гидрокарбонат-иона, кальция, магния, редкоземельных элементов. Методом факторного анализа выделены ассоциации элементов, которые образуются под воздействием разгрузки глубинных трещинно-жильных вод, грунтовых вод, обогащенных продуктами разложения пород, прошедших стадию морозного выветривания и насыщения озерной воды углекислым газом в зимний период. Методом термодинамического моделирования определено, что в озере достигается равновесие относительно кальцита и доломита, в результате садки карбонатных минералов в озерной воде накапливаются натрий и гидрокарбонат-ион, вода становится содовой.

*Ключевые слова:* морозное выветривание, содовые воды, разломы, гидротермы, свободные газы, ассоциации элементов, вымораживание.

**DOI:** 10.31857/S0321059621020097

### ВВЕДЕНИЕ

На Баргузинско-Чивыркуйском перешейке, соединяющем п-ов Святой Нос с восточным берегом Байкала, находится соленое оз. Бормашовое – единственное минеральное озеро на восточном побережье этого самого крупного в мире пресного водоема. Вода, заключенная в озере, относится к содовому типу. До сих пор в опубликованной литературе не дано объяснения образования этого феномена, который более ста лет сохраняет особенность своего химического состава среди многочисленных пресных озер [4]. До поднятия уровня Байкала плотиной Иркутской ГЭС на этом месте была цепочка не соединенных друг с другом содовых озер [18]. Площадь зеркала

оз. Бормашового 1.3 км<sup>2</sup>, длина 1.5 км, максимальная ширина 1.2 км, максимальная глубина 2.2 м. Считается, что водоем питается атмосферными осадками, небольшими ручьями, стекающими с окружающих болот, и грунтовыми водами современных и верхнечетвертичных отложений [7, 8]. Озеро бессточное, разгрузка озерных вод происходит за счет испарения и подземным стоком. Формирование ресурсов и химического состава воды этого озера вызывает интерес у многих поколений исследователей [13, 16, 19]. Одним из факторов формирования его геохимических особенностей может быть поступление азотных термальных вод, которые придают специфический геохимический облик его воде [7, 16, 20]. На исследуемой территории термальные воды содержат в повышенной концентрации сульфат-ион и относятся к сульфатному натриевому химическому типу, и их разгрузка в озеро должна была про-

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН (проект IX.137.1.4, государственная регистрация АААА-А17-117021310076-3), частично при поддержке РФФИ (проект 18-45-030003).

явиться в химическом составе заключенной в нем воды [21]. Но этого не наблюдается. Для выяснения факторов, которые привели к образованию этого природного феномена, авторами статьи проведены детальные геолого-геохимические исследования в этом районе.

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ БАРГУЗИН-ЧИВЫРКУЙСКОГО ПЕРЕШЕЙКА

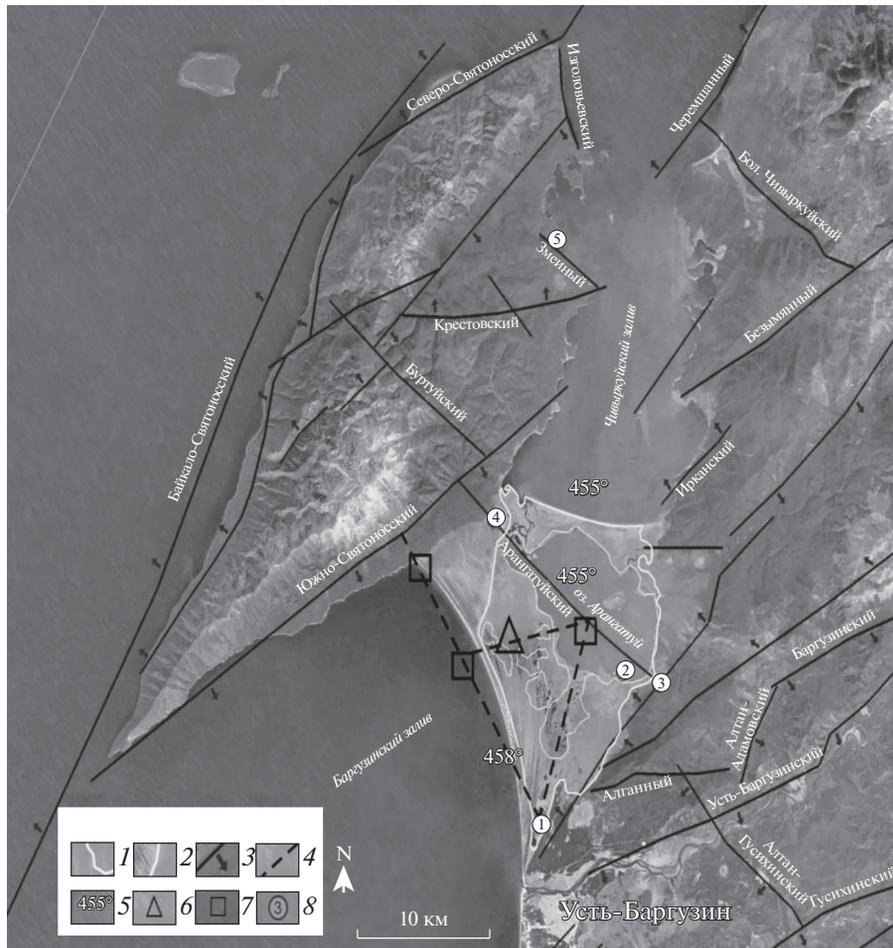
Баргузин-Чивыркуйский перешеек представляет собой грабен, который испытывает погружение в связи с развитием Байкальского рифта (рис. 1). С СЗ он ограничен разломом сбросового типа, который протягивается вдоль юго-восточной стороны п-ова Святой Нос. Направление простирания составляет  $58^\circ$ , направление падения  $148^\circ$ , угол падения  $50^\circ$  [14]. С ЮЗ грабен ограничен разломом, протягивающимся по ЮВ побережью оз. Арангатуй. Этот разлом сбросового типа простирается под углом  $40^\circ$ , угол падения —  $310^\circ$ . В условиях растяжения, преобладающих на территории, по этим субпараллельным разломам происходит опускание всего блока пород, слагающих перешеек. Вертикальные подвижки по разломам продолжаются до сих пор, эти разломы остаются проницаемыми для воды и газов [15]. Грабен разбит разломами на несколько разновеликих блоков, которые имеют наклон к центральной части перешейка и в разной степени испытывают погружение. В рельефе перешейка они выделяются ступенями с абсолютными отметками от 452 до 458 м. По разломам, разделяющим блоки, происходит подъем термальных вод и газов к поверхности; на рис. 1 обозначены места их разгрузки, выявленные ранее проведенными в этом районе исследованиями [7, 13]. Под воздействием глубинных трещинно-жильных вод в северной части перешейка поверхностные воды, заключенные в малых озерах и болоте, приобрели сульфат-ион в повышенных концентрациях [23]. Вода, заключенная в самом большом пресном озере перешейка — Арангатуйе, имеет двуслойное строение. Придонная вода относится к сульфатному натриевому химическому типу, приповерхностная — к гидрокарбонатному кальциево-натриевому типу [7].

Большинство исследователей считает, что перешеек образовался в результате интенсивного выпадения отложений, переносимых водными потоками с п-ова Святой Нос, Баргузинского хребта и из Баргузинской впадины [9, 12]. По современным представлениям, изначально Святой Нос был островом, а на месте перешейка был пролив, который постепенно заполнился осадками. На поверхности перешейка имеются песчаные валы, которые сформировались береговым прибоем. Конфигурация валов указывает на постепенное перемещение береговой полосы в сто-

рону Баргузинского залива [9]. В средней части перешейка в районе оз. Арангатуй мощность осадочных отложений, представленных озерно-речными отложениями, достигает 500 м, а на побережье Баргузинского залива — 360 м [7]. В их толще выделяются горизонты песков, глин, ила. Возраст осадочных пород установлен как миоцен-плиоцен-четвертичный [1, 12, 19]. Рыхлые отложения перешейка залегают на палеозойских гранитоидах крупнейшего в Центральной Азии Ангаро-Витимского батолита, породы которого слагают также п-ов Святой Нос и Баргузинский хребет [6, 13].

Другой характер имеют осадки, находящиеся в окрестностях оз. Бормашового. Здесь отложения сформировались в основном на суше. Скважина глубиной 59.8 м вскрыла четвертичные осадочные отложения, которые сверху представлены кварц-полевошпатовым разномелкозернистым (мощностью 7 м) и мелкозернистым (8 м) песком. Затем в разрезе находятся отложения глины (слой 2.5 м), которые сменяются кварц-полевошпатовым среднезернистым песком с дресвой (мощностью 9.6 м). В основной части разреза представлен кварц-полевошпатовый мелкозернистый глинистый песок с дресвой (32.7 м). Необходимо отметить присутствие в песке полевого шпата. Этот минерал, в отличие от кварца, в экзогенных условиях довольно активно взаимодействует с водой с образованием глины [24, 25]. А его присутствие в разрезе указывает на низкую степень взаимодействия этих пород с водой. В основном, вероятно, эти породы образовались за счет физического выветривания в континентальных условиях, на что указывает присутствие дресвы в осадках. Дресва — это порода типично континентальная, она не несет в себе следов переноса и обработки водой. Напротив, глина всегда образуется в присутствии воды, а глинистый горизонт мог сформироваться только в водном бассейне. На основе этого можно заключить, что район оз. Бормашового какое-то время был затоплен водой, когда и образовался горизонт пород, сложенных глиной. Но основная масса осадочных пород сформировалась в результате механического разрушения, физического и в меньшей степени химического выветривания интрузивных пород при недостатке влаги. Продукты выветривания не перемешались текущей водой, а сформировали отложения на склоне. Таким образом, хотя уровень воды в Байкале менялся, территория оз. Бормашового большую часть времени находилась на суше.

Каким образом могла образоваться эта толща осадочных пород? Дресва в условиях морозного климата образуется в увлажненных породах. В этом случае физическому выветриванию благоприятствует образование льда в трещинах. В этом районе основная часть пород, содержащих дресву, образовалась в период плейстоценового



**Рис. 1.** Космический снимок п-ова Святой Нос с Баргузин-Чивыркуйским перешейком с нанесенными разрывными нарушениями и местами опробования поверхностных и подземных вод. 1 – изолиния абсолютных отметок 455.5 м; 2 – изолиния 456 м; 3 – разрывные нарушения, стрелкой показано направление падения сброса; 4 – предполагаемые разрывные нарушения; 5 – абсолютные отметки поверхности; 6 – выявленные проявления грязевого вулканизма; 7 – места образования пропарин во льду и выделения метана; 8 – места отбора проб воды, газа (озера: 1 – Бормашовое, 2 – Арангатуй; источники: 3 – Арангатуйский, 4 – Кулины Болота, 5 – Змеинный).

горно-долинного оледенения, когда здесь преобладал суровый климат. С окружающих хребтов спускались ледники, уровень воды в Байкале был низким. В этих условиях породы интенсивно разрушались в зонах разломов за счет морозного выветривания, потому что там близко к поверхности поднимались трещинно-жильные воды. В зимний период вода в трещинах превращалась в лед и при расширении дробила породы. Таким образом, постепенно породы в пределах разломов вблизи поверхности оказались хорошо проницаемыми для воды. В них стала проникать вода с поверхности, началось движение воды вдоль разломов по направлению уклона под действием сил гравитации. Обмен воды в этих разломах стал больше по сравнению с окружающими породами, поэтому в них началось и более интенсивное взаимодействие воды с породами. В результате химического выветривания плагиоклаза образова-

лись глины, частицы которых из-за малых размеров уносились потоком движущейся воды. Поэтому в настоящее время разломы проявляются в рельефе линейно вытянутыми понижениями.

Поверхность Баргузин-Чивыркуйского грабена имеет общий наклон к С, в сторону Чивыркуйского залива. Наименьшие абсолютные отметки имеет котловина оз. Арангатуй, отметка уровня воды 455 м, поверхности дна 452–453 м. Это озеро сообщается протокой с Чивыркуйским заливом Байкала. От оз. Арангатуй к Ю простирается широкая заболоченная низина с абсолютными отметками поверхности ~455.5 м. Такая же абсолютная отметка и у водной поверхности оз. Бормашового, которое находится у самой южной оконечности перешейка. Немного южнее оз. Бормашового (~100 м) понижение в рельефе выклинивается, абсолютные отметки повышаются на

1.5–2 м. Низина, простирающаяся от оз. Арангатуй, не имеет выхода к Баргузинскому заливу.

Рассматриваемая низина с котловиной оз. Бормашового расположена в поле интенсивно разрушенных пород, связанных с процессами морозного выветривания в пределах разлома субмеридионального направления. Этот разлом присоединяется к сбросу, ограничивающему грабен Баргузин-Чивыркуйского перешейка с ЮВ (рис. 1). По сбросу в этот разлом поступают трещинно-жильные воды с Баргузинского хребта. Наиболее интенсивный сток с этого гидрогеологического массива происходит на пересечении разломов именно в районе оз. Бормашового, так как его котловина находится на пересечении разломов трех направлений (рис. 1). Блок коренных пород в этом месте раздробился и испытал погружение, понижение постепенно заполнилось осадочными породами. По разлому северо-западного направления с гидрогеологического массива Баргузинского хребта движутся трещинно-жильные воды, которые приносят тепло и придают специфический геохимический состав поверхностным водам в местах разгрузки. По субмеридиональному разлому, в пределах которого сформирована широкая зона хорошо проницаемых пород, происходит движение подземных вод в сторону оз. Арангатуй. Возможно, блоки пород, которые разграничивают этот разлом, наклонены друг к другу. Поэтому сток воды происходит интенсивно вблизи поверхности, уровень грунтовых вод приподнят и местность заболочена. Трещинно-жильные воды частично разгружаются непосредственно в оз. Бормашовое в виде восходящих источников, проходя через толщу осадочных пород. Места аквальной разгрузки – по границам блоков пород, вероятно, у западного и восточного берегов озера, так как с З и В котловина озера ограничена поднятиями, заросшими сосновым лесом, которые возвышаются над озером на 1.5–2 м.

Трещинно-жильные воды, разгружающиеся в котловину озера, проникают в недра в наиболее возвышенных частях окружающей территории. В пределах п-ова Святой Нос, который возвышается над перешейком на высоту >1400 м, формируются ресурсы термальных вод. Они глубоко проникают в недра, нагреваются и разгружаются в бух. Змеевой Чивыркуйского залива и на перешейке в местности Кулиные Болота в северо-западной части. В озеро они могут поступать с западного берега. Надо иметь в виду, что эти воды в значительной мере перехватываются разломами на границе гидрогеологического массива и впадины и в ее центральной части. До озера они доходят разбавленными поверхностными водами и не такими горячими, как в источниках. На В Баргузин-Чивыркуйский перешеек граничит с отрогами Баргузинского хребта, относительные пре-

вышения здесь составляют 600–700 м. Трещинно-жильные воды не так глубоко проникают в недра, поэтому в этом месте на хребте нет источников термальных вод. Только на юго-восточном берегу оз. Арангатуй с Баргузинского хребта разгружается источник холодных трещинно-жильных вод. Разгрузка этого источника происходит в пределах того же разлома, по которому с п-ова Святой Нос перемешаются термальные воды источника Кулиные Болота. В пределах котловины оз. Бормашового воды такого же химического типа могут разгружаться у его восточного берега.

## МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

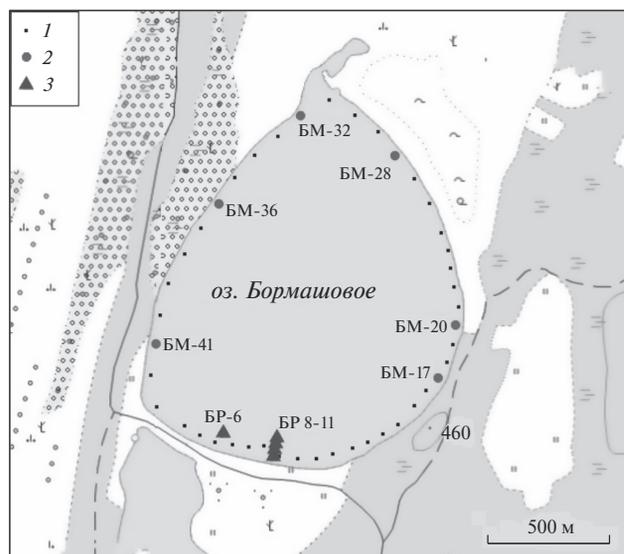
На формирование ресурсов и химического состава вод оз. Бормашового значительное влияние оказывает разгрузка трещинно-жильных вод, поэтому авторами изучены все доступные для исследования водопункты, расположенные на территории п-ова Святой Нос. Авторы предполагают, что разгрузка трещинно-жильных вод придает специфический геохимический облик придонной воде озера, поэтому провели измерение ее физико-химических параметров и исследование химического состава. При геохимических исследованиях были заданы профили вдоль западного и восточного берегов озера. Исследование озера проводилось в апреле и июле 2019 г. Весной опробование воды проводилось со льда, летом – с лодки, одновременно определяли географические координаты точек взятия проб. Точки наблюдения располагались в десяти метрах от берега, интервал между точками составлял 5 м. Схема опробования представлена на рис. 2. С помощью портативных приборов на глубине 1.5 м измеряли физико-химические параметры воды – температуру и pH. Проба воды отбиралась у дна озера специальным пробоотборником. Воду для анализа макрокомпонентов отбирали в пластиковые бутылки. Пробы воды на микроэлементы набирали в полипропиленовые контейнеры (15 мл), предварительно обработанные в лаборатории 0.1N азотной кислотой. На месте отбора проб образцы воды были пропущены через фильтры с порами размером 0.45 мкм и подкислены дважды перегнанной 0.1N азотной кислотой до pH 1–2. Пробы свободного газа, выделяющегося из донных отложений, отбирались методом вытеснения в стеклянные бутылки с гидрозатвором. При транспортировке до лаборатории бутылки хранились вниз горлышком. Анализ макрокомпонентного состава воды выполнен в сертифицированной лаборатории Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) по стандартным методикам. Анализ содержания микроэлементов проводился в Лимнологическом институте СО РАН (г. Иркутск) методом индуктивно связанной плазмы на

квадрупольном масс-спектрометре “Agilent 7500 се” (аналитик Е.П. Чебыкин). Состав свободного газа проанализирован методом газовой хроматографии в Научно-производственной фирме “Сибэкосервис” (г. Иркутск).

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На территории Баргузин-Чивыркуйского перешейка, кроме оз. Бормашового, расположено несколько водных объектов, исследование которых поможет выявить факторы, определяющие существование этого природного феномена. Самый крупный водоем на территории перешейка — оз. Арангатуй. Озеро питается стоком р. Буртуй с п-ова Святой Нос и р. Малый Чивыркуй с Баргузинского хребта. Имеется два источника азотных термальных вод. Змеиный источник разгружается в бух. Змеевой Чивыркуйского залива. Его ресурсы, химический состав воды и газа формируются в пределах п-ова Святой Нос. Термальный источник Кулиные Болота разгружается на территории перешейка, он проявляется на поверхности в виде нескольких мочажин с теплой водой. Площадь разгрузки теплых вод составляет  $>10000 \text{ м}^2$ . Этот источник также связан с гидротермальными системами п-ова Святой Нос. На юго-восточном побережье оз. Арангатуй происходит разгрузка источника пресных, холодных трещинно-жильных вод. Ресурсы, химический состав воды и газа этого источника связаны с Баргузинским хребтом. В табл. 1, 2 представлен химический состав этих водных объектов.

Как видно из результатов анализа, все исследованные водопункты п-ова Святой Нос характеризуются щелочной реакцией среды. В оз. Бормашовом установлено значение рН, близкое к характерным для азотных термальных вод. Концентрация натрия в водах озера доминирует над концентрациями других катионов, что характерно и для термальных вод. В озере установлены также высокие содержания фторид-иона, кремниевой кислоты, что характерно для термальных вод Байкальской рифтовой зоны. В отличие от термальных вод, в оз. Бормашовом обнаруживаются в повышенных концентрациях хлорид-ион,



**Рис. 2.** Картограмма территории опробования придонной воды оз. Бормашового. 1 — места измерения физико-химических параметров воды; 2, 3 — места отбора проб воды для определения химического состава воды летом и весной 2019 г. соответственно.

магний и в относительно низкой концентрации — сульфат-ион. Общая минерализация воды в озере в  $\geq 2$  раза выше, чем в других водопунктах. Несомненно, в озере происходит концентрирование растворенных веществ за счет удаления воды при испарении и за счет возгонки при образовании ледового покрова.

В микроэлементном составе оз. Бормашового выделяется в повышенных концентрациях группа химических элементов, характерных для азотных термальных вод этого района (табл. 2). Наиболее значимо разгрузка термальных вод проявляется в высоких содержаниях в озере фосфора, бора, алюминия, вольфрама, молибдена, мышьяка, селена. Разгрузка в озеро трещинно-жильных вод неглубокого заложения и грунтовых вод, вероятно, сказывается на росте концентрации таких элементов, как уран, железо, стронций.

Результаты исследования свободного газа, выделяющегося в местах разгрузки источников тре-

**Таблица 1.** Содержание макрокомпонентов в поверхностных и подземных водах п-ова Святой Нос, мг/дм<sup>3</sup> (здесь и в табл. 4 и 6: ПО — перманганатная окисляемость, ОМ — общая минерализация)

Водопроявление	рН	Na	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	F	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	ПО	ОМ
оз. Бормашовое	9.1	397.8	25	13.38	738.3	24.0	14.8	47.2	25.5	39.6	32.2	1464.9
оз. Арангатуй	7.5	13.5	10	3.04	61.0	0.1	3.3	9.5	1.83	3.5	15.6	108.6
Источник Кулиные Болота	9.6	243.8	2	0.01	91.5	21.0	125.0	31.2	35.5	198.2	5.3	735.0
Источник Змеиный	9.5	106.9	1	0.01	152.5	9.0	89.4	5.7	16.17	175.8	10.1	493.0
Источник Арангатуйский	7.8	4.4	8	8.51	57.9	0.1	2.3	6.4	1.86	37.1	0.7	114.7

**Таблица 2.** Содержание микроэлементов в водных объектах п-ова Святой Нос, мкг/дм<sup>3</sup>

Химический элемент	оз. Бормашовое	оз. Арангатуй	Источник Кулиные Болота	Источник Змеиный	Источник Арангатуйский
B	80	49	54	422	6
Li	9	10	126	42	3
Al	72.3	10.3	26.5	13.7	6.5
P	874	37	17	245	10
Ti	3.88	0.40	0.77	0.45	0.18
V	6.03	0.84	0.31	0.08	0.21
Cr	3.1	4.1	0.6	0.2	2.0
Mn	20.47	1.91	1.40	4.25	0.59
Fe	580.5	95.7	114.7	12.5	22.4
Co	0.138	0.029	0.043	0.027	0.013
Ni	0.90	0.59	0.66	0.36	0.45
Cu	3.70	2.17	1.55	0.45	2.49
Zn	12.3	16.2	10.6	5.1	10.6
As	3.66	0.67	0.56	0.05	0.08
Se	2.61	0.74	46.87	0.04	1.36
Rb	3.3	0.7	27.2	14.5	0.2
Sr	256	100	230	69	110
Y	0.1919	0.0089	0.0143	0.0045	0.0145
Zr	0.666	0.163	0.272	0.092	0.152
Mo	2.17	2.51	5.30	1.31	1.44
Cd	0.049	0.052	0.046	0.058	0.025
Sn	0.45	0.10	0.25	0.16	0.10
Sb	0.23	0.22	0.06	0.05	0.12
Cs	0.03	0.02	5.08	3.39	0.01
Ba	32	12	3	2	10
W	31.03	4.71	30.82	12.8	0.35
Pb	4.96	0.57	0.59	0.35	0.47
U	0.544	0.511	0.139	0.024	2.67

**Таблица 3.** Химический состав свободных газов в водопрооявлениях п-ова Святой Нос, %

Водопункт	Азот	Метан	Углекислый газ	Кислород	Гелий	Водород
оз. Бормашовое	74.5	22.6	1.4	0.75	$3.73 \times 10^{-3}$	$2.9 \times 10^{-4}$
оз. Арангатуй	69.57	25.55	3.13	1.02	$3.77 \times 10^{-4}$	$5.68 \times 10^{-4}$
Источник Кулиные Болота	83.83	13.77	0	1.56	0.108	$3.98 \times 10^{-4}$
Источник Змеиный	98.9	0.13	0	0.045	0.155	$2.35 \times 10^{-4}$
Источник Арангатуйский	85.68	$1.76 \times 10^{-4}$	0.07	13.53	$2.92 \times 10^{-4}$	$9.32 \times 10^{-5}$

щинно-жилых вод и из донных отложений озер, представлены в табл. 3.

Во всех водопрооявлениях в свободном газе доминирует азот. Его максимальные содержания установлены в источниках термальных вод, что вполне согласуется с представлениями о его кон-

центрировании при длительном взаимодействии воды с алюмосиликатными горными породами [21]. Относительно высокие содержания метана установлены в обследованных озерах и источнике Кулиные Болота. Метан поступает в воду при разложении в восстановительных условиях органи-

**Таблица 4.** Содержание макрокомпонентов в оз. Бормашовом летом (пробы воды отобраны 16.07.2019), мг/дм<sup>3</sup>

№ пробы	T, °C	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	pH	ОМ
БМ-32	19.6	373.0	32.6	7.3	790.1	24.0	2.0	12.5	56.7	24.2	57.8	10.9	1416.9
БМ-36	18.7	377.9	27.0	10.9	805.4	31.5	0.6	12.7	55.3	21.0	51.1	10.7	1430.5
БМ-41	21.8	377.3	31.0	8.2	793.2	33.0	3.1	12.3	53.8	23.4	60.9	11.0	1428.4
Среднее у западного берега	20	376.1	30.2	8.8	796.2	29.5	1.9	12.5	55.3	22.9	56.6	10.8	1425.3
БМ-17	21.7	365.4	31.0	8.5	787.1	21.0	1.9	12.7	55.3	22.2	51.5	10.3	1393.8
БМ-20	22.2	363.0	31.0	7.9	774.9	21.0	2.0	12.3	54.6	23.9	48.0	10.8	1376.3
БМ-28	22.6	358.1	32.0	8.7	787.1	21.0	1.7	13.8	55.3	19.0	53.3	10.8	1388.3
Среднее у восточного берега	22	362.2	31.3	8.4	783.0	21.0	1.8	12.9	55.07	21.7	50.9	10.6	1386.1
Среднее по всему озеру	21	369.1	30.7	8.6	789.6	25.2	1.9	12.7	55.2	22.3	53.7	10.7	1405.7

ческих остатков, заключенных в осадочных породах, заполняющих грабен Баргузин-Чивыркуйского перешейка, а также из донных отложений озер и болот. Очень низкие содержания метана установлены в Арангатуйском источнике, так как элювиальные отложения, которые он дренирует, сформировались при морозном выветривании гранитов и практически не содержат органических веществ. В этом источнике установлены очень высокие содержания кислорода атмосферного происхождения, так как здесь происходит разгрузка трещинно-жильных вод неглубокого заложения. В других исследованных водопунктах содержание этого химически очень активного газа невелико, так как он поступает в воды только вблизи поверхности и быстро расходуется на реакции окисления. В относительно больших количествах в озерах обнаружен углекислый газ, что указывает на протекание окислительных процессов в донных отложениях. Интересны результаты определения гелия в этих водных объектах. Наблюдается большая дисперсия его концентрации в обследованных водопунктах, которая достигает величин трех математических порядков. Наиболее высокие содержания этого газа установлены в термальных водах, что объясняется связью этих вод с глубоко проникающими в недра тектоническими нарушениями. В свободном газе, выделяющемся из донных отложений оз. Бормашового, содержание гелия почти на порядок выше, чем в оз. Арангатуй. Возможно, это связано с тем, что в акватории оз. Бормашового есть тектонические нарушения, открытые для проникновения газов из недр. По этим разломам, вероятно, поступают азот, гелий, а с водой привносятся растворенные химические элементы, накопившиеся при ее длительном взаимодействии с породами.

Летом 2019 г. авторами проведено геолого-геохимическое обследование всей акватории озера, отобрано и проанализировано шесть проб воды, схема опробования приведена на рис. 2; результаты анализов представлены в табл. 4, 5.

По данным анализа макрокомпонентного состава, вода, заключенная в оз. Бормашовом, имеет неоднородный химический состав. Общая минерализация воды возле западного берега в среднем составляет 1425 мг/дм<sup>3</sup>, тогда как возле восточного берега — всего 1386 мг/дм<sup>3</sup>. Возле западного берега установлены существенно более высокие содержания натрия и гидрокарбонат-карбонат-ионов, фторид-иона и кремниевой кислоты. Вода имеет более щелочную реакцию среды.

У западного побережья зафиксированы повышенные относительно средних значений содержания бора, вольфрама, меди, никеля, олова и сурьмы. В микроэлементном составе воды, отобранной у восточного берега озера, повышенными содержаниями отличаются алюминий, фосфор, марганец, железо, цинк и свинец.

Зимой озеро покрывается льдом, мощность ледяного покрова достигает 1.5–1.7 м. На поверхности льда наблюдаются ледяные наросты округлой формы, связанные с прорывом высокоминерализованных вод из межледового пространства во время формирования ледяного покрова, на поверхности льда видны выцветы солей. Результаты анализа водных проб приведены в табл. 6 и 7.

В ледовый период наблюдаются более высокая общая минерализация озерной воды и рост концентрации других компонентов; так, в ледовый период соленость воды в озере была выше, чем летом в 1.3 раза. Концентрирование солей при формировании ледового покрова происходит в основном за счет вымораживания воды из раствора, вследствие чего растворенные вещества накапливаются в остающейся жидкой фазе. Некоторые компоненты не подчиняются этой общей закономерности. Так, по сравнению с ростом общего содержания растворенных веществ, в подледный период установлено значительно более высокое концентрирование кальция, нитрат-иона, сульфат-иона и карбонат-гидрокарбонат-ионов. Авторы предполагают, что в зимний период на формирование химического состава воды в

**Таблица 5.** Содержание микроэлементов в оз. Бормашовом летом (июль 2019 г.), мкг/дм<sup>3</sup>

Химический элемент	БМ-32	БМ-36	БМ-41	Среднее, западное побережье	БМ-17	БМ-20	БМ-28	Среднее, восточное побережье
Li	10.2	10.2	10.7	10.3	10	10.4	10.3	10.2
B	139	134	136	136.3	133	137	132	134
Rb	4.9	5	5.1	5	5.2	5	5.2	5.1
Cs	0.024	0.024	0.02	0.022	0.138	0.041	0.037	0.072
Sr	310	310	320	313.3	320	320	310	316.6
Ba	49	49	56	51.3	49	50	51	50
Al	103	106	115	108	76	103	230	136.3
P	1420	1440	1380	1413	1420	1460	1470	1450
Ti	5.8	7.2	5.7	6.2	4.1	4.8	13	7.3
V	26	26	28	26.7	27	27	30	28
Cr	1.1	1.21	1.48	1.26	1.06	1.3	1.59	1.32
Mn	7.9	4.9	10.3	7.7	11.7	10.4	36	19.3
Fe	360	350	430	380	340	360	760	466
Co	0.28	0.23	0.3	0.27	0.28	0.31	0.49	0.36
Ni	6.1	3.7	2.6	4.1	1.26	0.79	0.95	1
Cu	4.1	5.6	5.9	5.2	4.1	5.3	5.3	4.9
Zn	5.8	8.3	18.6	10.9	5.4	21	17	14.5
Cd	0.036	0.047	0.049	0.044	0.052	0.07	0.07	0.064
Pb	0.25	0.89	1.89	1.01	0.87	2	1.68	1.52
Bi	0.037	0.02	0.103	0.05	0.008	0.03	1.16	0.4
As	3.7	3.7	3.8	3.75	3.8	3.9	3.7	3.8
Mo	1.43	1.52	1.49	1.48	1.51	1.62	1.47	1.53
Sn	0.43	0.38	0.34	0.38	0.46	0.22	0.27	0.32
Sb	0.4	0.32	0.26	0.33	0.25	0.24	0.27	0.25
W	44	45	45	44.5	42	43	44	43
Th	0.167	0.19	0.176	0.17	0.126	0.172	0.25	0.18
U	0.73	0.83	0.8	0.77	0.67	0.72	0.78	0.72

**Таблица 6.** Содержание макрокомпонентов в оз. Бормашовом в подледный период (пробы отобраны 10.04.2019, мг/дм<sup>3</sup> (здесь и в табл. 7 КК – отношение средних содержаний компонентов в пробах озерной воды, когда оно было покрыто льдом (10.04.2019) к содержаниям в пробах, отобранных в безледный период (16.07.2019 г.))

№	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	pH	ОМ
БР-6	461.3	48.1	9.7	1080.0	55.5	2.6	18.9	63.8	28.5	81.2	8.6	1819.9
БР-8	485.3	44.0	12.1	1195.9	27.0	1.9	26.7	61.7	28.5	76.9	8.9	1931.9
БР-9	456.5	50.1	9.7	1073.9	54.0	5.4	15.6	60.2	31.5	79.8	8.8	1807.4
БР-10	440.1	50.1	7.3	1061.7	57.0	6.5	25.9	63.1	27	78.6	8.4	1808.8
БР-11	446.1	50.1	8.5	1122.7	36.0	4.9	27.5	63.1	28	80.3	8.4	1858.1
Среднее	457.9	48.5	9.5	1106.8	45.9	4.3	22.9	62.38	28.7	79.4	8.6	1845.2
КК	1.24	1.58	1.1	1.4	1.82	2.26	1.8	1.1	1.29	1.48		1.3

озере большое влияние оказывает процесс окислительного разложения накопившейся за лето растительности и залегающего почти по всей ак-

ватории озера сапропеля. Образующийся при разложении органического вещества донных отложений углекислый газ из-за ледового покрова

**Таблица 7.** Содержание микроэлементов в оз. Бормашовом в подледный период, мкг/дм<sup>3</sup> (среднее, “зима” – среднее содержание в пробах воды, когда озеро было покрыто льдом (10.04.2019); среднее, “лето” – среднее содержание в пробах, отобранных в безледный период (16.07.2019))

Химический элемент	БР-10	БР-11	БР-9	БР-6	БР-8	Среднее, “зима”	Среднее, “лето”	КК
Li	15.6	15.9	15.8	15.6	15.3	15.6	10.3	1.5
B	220	220	220	220	220	220.0	135.1	1.6
Rb	6.9	7.1	7.1	7.1	7.1	7.06	5.1	1.4
Cs	0.012	0.013	0.013	0.024	0.018	0.02	0.047	0.4
Sr	460	490	480	480	480	478.0	314.9	1.5
Ba	76	83	79	71	80	77.8	50.6	1.5
Al	18.8	65	38	22	31	34.9	122.1	0.3
P	1880	2000	2000	2100	2100	2016.0	1431.5	1.4
Ti	1.9	2.5	1.4	2.9	1.6	2	6.7	0.3
V	42	42	41	41	42	41.6	27.3	1.5
Cr	1.39	1.37	1.36	1.9	1.8	1.5	1.29	1.2
Mn	2.3	4.8	1.47	4.7	4.4	3.5	13.5	0.2
Fe	70	123	94	107	111	101	423	0.2
Co	0.22	0.22	0.21	0.29	0.26	0.24	0.31	0.8
Ni	5.9	12.7	6		4.6	6.7	2.55	2.6
Cu	5.3	8.7	5.3		5.8	6.2	5	1.2
Zn	3.6	12.1	4.7	1.9	3.7	5.2	12.7	0.4
Cd	0.025	0.045	0.042	4.5	0.07	0.05	0.054	0.9
Pb	0.13	0.1	0.068	5.9	0.097	0.12	1.16	0.1
Bi	0.0052	0.007	0.0052	0.0056	0.007	0.01	0.045	0.2
As	5.6	5.3	5.3	5.9	5.4	5.5	3.77	1.4
Mo	3.3	3.1	2.7	5.1	3.3	3.5	1.5	2.3
Sn	0.68	0.5	0.12	0.4	0.2	0.38	0.35	1.1
Sb	0.42	0.51	0.49	0.56	0.59	0.51	0.29	1.7
W	65	66	63	63	64	64.2	43.7	1.5
Th	0.128	0.2	0.158	0.122	0.158	0.15	0.17	0.9
U	1.17	1.04	0.96	1.16	1.06	1.08	0.74	1.4

не может удаляться из воды. Его парциальное давление и содержание в растворенном состоянии возрастают, вследствие чего уменьшается рН воды озера. Растворимость карбоната кальция с ростом парциального давления возрастает, соответственно интенсивно растет содержание кальция и карбонат-иона в озерной воде. Так как угольная кислота нейтрализует избыточную щелочность, реакция озерной воды становится менее щелочной. В этих условиях равновесие между продуктами диссоциации угольной кислоты нарушается из-за образования гидрокарбонат-иона, поэтому в подледный период наблюдается более интенсивный рост его концентрации, чем рост общей минерализации воды.

В ледовый период наблюдается рост концентрации химических элементов, которые поступают

в озеро в результате разгрузки трещинно-жильных вод (табл. 7). Разгрузка глубинных трещинно-жильных вод, в отличие от разгрузки поверхностных вод, в подледный период не прекращается, поэтому в этот период наблюдается интенсивный рост содержания микроэлементов, которые приносятся с этими водами, – никеля, молибдена, сурьмы, бора, вольфрама, лития, стронция, бария. Содержание в озере таких микроэлементов, как свинец, висмут, железо, марганец, титан, цезий, в зимний период уменьшается, вероятно, из-за того, что эти элементы поступают в озеро в основном с потоком грунтовых вод, а в зимний период объем их стока уменьшается.

После вскрытия ледяного покрова из раствора удаляется избыточный углекислый газ, вода становится более щелочной, вследствие этого часть

**Таблица 8.** Ассоциации элементов, выявленные факторным анализом содержаний микроэлементов в воде оз. Бормашового в ледовый и безледный периоды 2019 г.

Фактор	Ассоциация элементов	Вес, %
Разгрузка гидротерм	Li, B, Si, P, V, As, Br, Rb, Sr, Mo, Sb, I, Ba, W, Hg, U	26.2
Влияние уменьшения pH в ледовый период	Y, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb, Be, Cu, Zn, Ni	13.2
Химическое выветривание интрузивных пород грунтовыми водами	Al, Ti, Mn, Fe, Co, Zr, Nb, Pd, Ag, Hf, Bi, Th	13

**Таблица 9.** Насыщенность воды оз. Бормашового относительно некоторых карбонатных и сульфатных минералов в летний и зимний периоды

Период	Кальцит	Доломит	Магнезит	Гипс	Эпсомит	Кизерит	Сакиит	Мирабилит
Летний	2.65	4.61	-1.83	-9.92	-19.4524	-73.4241	-110.643	-139.034
Зимний	0.098	0.24	-3.64	-6.02	-14.813	-68.7845	-106.004	-138.802

гидрокарбоната превращается в карбонат-ион и происходит садка карбоната кальция. Вероятно, одновременно при разрушении карбонатных комплексов из раствора удаляется часть неустойчивых в растворе микроэлементов [2]. В меняющихся геохимических условиях наиболее устойчивы в растворе микроэлементы, находящиеся в анионной форме, – такие как молибден, сурьма, бор, ванадий, вольфрам, фосфор, а также щелочные и щелочноземельные элементы – литий, барий, стронций.

Для установления корреляционной связи между растворенными компонентами выполнен факторный анализ химического состава воды озера. В выборку включены пробы, отобранные в ледовый и безледный периоды. Применен многомерный анализ методом главных компонент, модификация варимакс. Результаты факторного анализа представлены в табл. 8.

В выборке выделяются три фактора со значимым весом изменчивости. В первом факторе ассоциацию элементов составляют микроэлементы, поведение которых находится в корреляционной связи с их поступлением в озерную воду из одного источника. Вероятно, их концентрация в озерной воде определяется разгрузкой гидротерм. В зимний период, когда доля термальных вод в питании озера возрастает, их концентрация растет; летом, когда в питании озера начинают участвовать атмосферные осадки, грунтовые и трещинно-жильные воды неглубокого заложения, содержание уменьшается. Второй фактор объединяет химические элементы, устойчивость в растворе которых зависит от образования карбонатных комплексных соединений. В зимний период в озерной воде возрастает содержание продуктов диссоциации угольной кислоты и, соответственно, увеличивается содержание выявленной ассоциации химических элементов. В третьем факторе в ассоциацию объединены хи-

мические элементы, поведение которых зависит от разгрузки в озеро грунтовых вод. Эти элементы выщелачиваются из горных пород, слагающих окружающую территорию. Породы прошли стадию физического выветривания, раздроблены криогенезом, имеют большую активную поверхность. Эти породы разлагаются движущимся через них потоком воды. Выделенная в этом факторе ассоциация элементов поступает в раствор в результате реакций гидролиза полевых шпатов, окисления сульфидных минералов, выщелачивания адсорбированных элементов из поглощающего комплекса.

Проведенные натурные исследования показали, что химический состав озерной воды в течение года испытывает значительные изменения. Для выяснения возможности образования аутигенных минералов проведены расчеты равновесий относительно ряда гипергенных минералов. Термодинамические расчеты проведены по программе HidroGeo 32 [3]. Установлено, что вода оз. Бормашового находится в равновесии только с такими карбонатными минералами, как кальцит и доломит (табл. 9).

Расчеты показывают, что в летний период осаждение карбонатов кальция и магния может происходить с большей вероятностью, чем зимой. Но основная садка карбонатных минералов происходит, вероятно, в период разрушения ледового покрова, когда из озерной воды удаляется избыточный углекислый газ. Вероятно, садка карбонатов от года к году происходит с разной интенсивностью, так как она зависит от меняющихся климатических условий в регионе [22].

#### ФАКТОРЫ И ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ СОДОВЫХ ВОД В оз. БОРМАШОВОМ

Образование содовых вод в природе обычно происходит в результате длительного взаимодей-

ствия воды с горными породами, в условиях замедленного водообмена [10, 11, 24, 26]. Поверхностные водоемы, содержащие содовые воды, чаще всего формируются в аридных областях, где в бессточных котловинах с большой площадью водосбора происходит концентрирование растворенных веществ за счет испарения [2]. Большое влияние на трансформацию химического состава оказывает жизнедеятельность микроорганизмов [17].

Рассматриваемый район представляет собой горно-складчатую область, где господствуют гумидные климатические условия. В районе сформирована густая гидрографическая сеть с активным водообменом. На окружающей территории распространены интрузивные горные породы, которые слабо подвержены выветриванию, поэтому грунтовые воды, поверхностные водотоки, водоемы содержат слабоминерализованные воды. В оз. Байкал общая минерализация составляет в среднем  $96 \text{ мг/дм}^3$ .

Представляется, что образованию минерального озера в этом районе благоприятствовали несколько факторов. Первый фактор связан со сложившимися тектоническими условиями. Выше показано, что поверхность фундамента перешейка и осадочных отложений наклонена к С в сторону Чивыркуйского залива. Соответственно, сток поверхностных и подземных вод, заключенных в осадочных отложениях, происходит в основном в том же направлении. А котловина оз. Бормашового находится в самой южной — наиболее поднятой части этого блока пород. От Баргузинского залива котловина озера отделена естественным поднятием, поэтому вода из Байкала за историческое время никогда не поступала в озеро. Более того, оз. Бормашовое расположено в вершине дренажной системы, сформированной в зоне разрывных нарушений меридионального направления. Поверхностный сток может поступать в озеро только с очень малой территории, расположенной к Ю от него. Ресурсы озерных вод формируются в основном за счет разгрузки подземных трещинно-жильных вод и атмосферных осадков, выпадающих в его акватории. Вследствие этого озеро характеризуется малой интенсивностью водообмена.

Второй фактор образования высокоминерализованных содовых вод связан с химическим составом и температурой трещинно-жильных вод, в основном за счет которых происходит питание озера. Выше сказано, что котловина озера находится на пересечении разломов трех направлений. По двум из них, вероятно, происходит поступление в озеро трещинно-жильных вод, а по третьему — частично их сток. Разлом северо-восточного направления относится к системе листрических сбросов, сформировавшихся при

вздымании Баргузинского хребта. По нему происходило сползание блока пород, находящихся на границе горста и грабена. Он имеет наиболее низкие абсолютные отметки в системе листрических сбросов, и по нему за счет гидростатического давления близко к поверхности земли поднимаются нагретые в недрах трещинно-жильные воды. Авторами показано, что породы в зоне этого разлома сильно раздроблены за счет не только разрушения при тектонических подвижках, но и морозного выветривания пород. Поэтому породы активно взаимодействуют с водой, в растворе накапливаются кальций, натрий, магний, микроэлементы. В результате разгрузки этих вод растет минерализация озерной воды, она обогащается многими биоактивными химическими элементами. Разлом северо-западного простирания пересекает весь грабен Баргузин-Чивыркуйского перешейка. По нему движутся воды глубокого заложения как с п-ова Святой Нос, так и с Баргузинского хребта. Примерно посередине перешейка он пересекается разломом северо-восточного простирания, в этом месте наблюдается разгрузка термальных вод сульфатного натриевого типа, которые проявляются в повышенных содержаниях сульфат-иона в малых озерах, болотах и поверхностных водотоках. На пересечении этих разломов наблюдаются пропарины во льду в акватории Баргузинского залива, грязевый вулканизм и спонтанные выделения метана. А поток трещинно-жильных вод, движущийся с Баргузинского хребта, перехватывается меридиональным разломом, в пределах которого находится котловина оз. Бормашового. Так как перепад абсолютных высот в этом месте Баргузинского хребта небольшой, то глубина проникновения трещинно-жильных вод не столь большая, как в пределах п-ова Святой Нос. Время взаимодействия воды с породами и степень метаморфизации воды невысоки, в основном эти воды относятся к гидрокарбонатному кальциево-натриевому типу с минерализацией воды  $200\text{--}250 \text{ мг/дм}^3$  [21]. Температура этих трещинно-жильных вод, предположительно,  $10\text{--}20^\circ\text{C}$ . В результате разгрузки трещинно-жильных вод в озере накапливаются биоактивные элементы, такие как фосфор, калий, железо, цинк, медь и др., что благоприятствует развитию фитопланктона.

Летом вода в озере очень быстро прогревается, в том числе за счет подпитки теплыми водами, и зацветает. Щелочные условия обуславливают развитие в водах и донных осадках алкалофильных микроорганизмов, способных проводить биохимические реакции в щелочных условиях среды [5]. При обследовании озера установлено, что вся толща воды заполнена микроводорослями. Зимой микрофлора отмирает и оседает на дно водоема. Так как в акваторию озера разгружаются теплые воды, то донные отложения перерабаты-

ваются микроорганизмами круглый год. Наблюдаются тесные взаимоотношения между бактериями-продуцентами органического вещества и бактериями-деструкторами, что обеспечивает устойчивость алкалофильного прокариотного сообщества. В деструкции органического вещества участвуют различные виды бактерий-деструкторов. Между слоями бактериальных матов отлагаются карбонаты [17]. В раствор поступают продукты разложения органического вещества, в том числе и конечный продукт их окислительного разложения – углекислый газ. Высокая биопродуктивность озера, несмотря на изменения климата, сохраняется длительное время, поэтому на дне озера сформировались отложения сапропеля. Грязевая залежь занимает большую часть озерной котловины. Она имеет двухслойное строение: верхняя часть (0.0–0.7 м) сложена сапропелями серого цвета, нижняя (0.7–1.5 м) – сапропелем черного цвета. Средняя мощность грязевой залежи составляет 0.64, максимальная – 1.5 м. Окислительное разложение отмершей растительности и сапропеля – третий фактор трансформации химического состава воды по содовому направлению. В результате разложения сапропеля и остатков водной растительности вода озера насыщается углекислым газом. В зависимости от рН среды в растворе могут существовать разные формы диссоциации угольной кислоты. В нейтральных и слабощелочных условиях водной среды основная форма существования – гидрокарбонат-ион.

Четвертый фактор формирования содовых вод в озере – образование в зимний период ледового покрова. В результате замерзания воды происходит концентрирование растворенных веществ в озерной воде. Кроме того, ледяной покров препятствует удалению из воды образующегося углекислого газа. Авторами показано, что в результате сложных преобразований форм нахождения угольной кислоты из раствора высаживаются карбонат кальция и карбонат магния. В результате этого в озерной воде накапливаются натрий и гидрокарбонат-ион, вода становится содовой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены основные причины образования минерализованного содового оз. Бормашового, расположенного на побережье Байкала. Показано, что котловина озера приурочена к породам, сильно раздробленным морозным выветриванием. Она отделена от Байкала тектоническим поднятием, поэтому озеро не испытывает воздействия байкальской воды. Так как фундамент, слои осадочных пород и поверхность Баргузин-Чивыркуйского перешейка наклонены к С, поверхностный сток в озеро весьма ограничен, происходит с очень малой территории, расположенной к Ю от него. Озеро питается в основном трещин-

но-жильными, грунтовыми и атмосферными водами. Под воздействием разгрузки трещинно-жильных и грунтовых вод в озере накапливаются биологически активные химические элементы. В летний период вода озера быстро и интенсивно прогревается и зацветает. Зимой в результате разложения органических остатков и отложений сапропеля в озере создается избыточное давление углекислого газа, уменьшается рН среды, возрастает содержание кальция, карбонат-иона. При разрушении ледового покрова парциальное давление углекислого газа уменьшается и происходит садка карбонатных минералов кальция и магния. В результате этого в озерной воде накапливаются натрий и гидрокарбонат-ион, вода становится содовой. Так как в минеральном озере сформирована щелочная среда, в растворе устойчивы микроэлементы, образующие в растворе анионы, среди них выделяются фосфор, бор, вольфрам.

Бормашовое озеро представляет собой уникальный водный объект с соленой водой, существующий длительное время всего в 1 км от Байкала. Его образование тесно связано с геологической историей Баргузин-Чивыркуйского перешейка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Летунова П.П., Шестакова О.Н. Направленность изменений растительности и климата Байкальского региона за последние 5 млн лет по данным палинологического исследования осадков озера Байкал // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 5. С. 739–749.
2. Борзенко С.В., Федоров И.А. Закономерности поведения некоторых микроэлементов в минеральных озерах Восточного Забайкалья // Успехи современного естествознания. 2019. № 1. С. 69–74.
3. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения в области нефтегазовой гидрогеологии // Разведка и охрана недр. 1997. № 2. С. 37–39.
4. Верещагин Г.Ю. Отчет о работах, произведенных на Байкале во время командировки от Императорской Академии Наук летом 1916 года // Тр. Комиссии по изучению оз. Байкал. 1918. Т. 1. Вып. 1. 104 с.
5. Горленко В.М., Намсараев Б.Б., Кулырова А.В. и др. Активность сульфатредуцирующих бактерий в донных осадках содовых озер Юго-Восточного Забайкалья // Микробиология. 1999. Т. 68. № 5. С. 664–670.
6. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Л. N-49-XVI (Карафтит). Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. 102 с.
7. Дзюба А.А., Кулагина Н.В., Абидуева Т.И., Черных А.Л. Минеральные озера Баргузинско-Чивыркуйского перешейка // География и природ. ресурсы. 2002. № 2. С. 61–67.
8. Дзюба А.А., Тулохонов А.К., Абидуева Т.И., Гребнева П.И. Палеогеографические аспекты формиро-

- вания соленых озер Баргузинской котловины // География и природ. ресурсы. 1997. № 4. С. 65–71.
9. *Дмитриев Г.Л.* История осадконакопления на перешейке полуострова Святой Нос (Байкал) // Мезозойские и кайнозойские озера Сибири. М., 1968. С. 89–97.
  10. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец Б.М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
  11. *Лепокурова О.Е.* Содовые подземные воды юга Кузбасса: изотопно-химические особенности и условия формирования // Геохимия. 2018. № 9. С. 904–919.
  12. *Логачев Н.А.* О рациональном районировании геологической структуры впадины озера Байкал // ДАН. 2000. Т. 375. № 5. С. 657–661.
  13. *Ломоносов И.С., Мясников А.А., Абалаков А.Д.* Радиогеохимия природных вод Баргузино-Чивыркуйского перешейка (Забайкальский национальный парк) // Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России. Подземная гидросфера. Иркутск: ИРГТУ, 2006. С. 61–86.
  14. *Лунина О.В.* Разломы и сейсмически индуцированные геологические процессы на юге Восточной Сибири и сопредельных территориях. Новосибирск: СО РАН, 2016. 226 с.
  15. *Лунина О.В., Гладков А.С.* Активные разломы и поля напряжения северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 2. С. 1–11.
  16. Минеральные воды южной части Восточной Сибири / Под ред. *В.Г. Ткачук, Н.И. Толстихина.* М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. 1. 346 с.
  17. *Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д.* Содовые озера южного Забайкалья – уникальные экосистемы // Вестн. Бурятского гос. ун-та. Биология. География. 2018. № 1. С. 82–86.
  18. *Намсараев Б.Б., Хахинов В.В., Гармаев Е.Ж., Бархутова Д.Д., Намсараев З.Б., Плюснин А.М.* Водные системы Баргузинской котловины. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского гос. ун-та, 2007. 152 с.
  19. Палеолимнологические реконструкции. Байкальская рифтовая зона / Отв. ред. *Н.А. Логачев.* Новосибирск: Наука, 1989. 109 с.
  20. *Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Гармаева С.З., Будаев Р.Ц., Жамбалова Д.И.* Особенности формирования химического состава озерных вод вдоль восточных берегов Байкала // География и природ. ресурсы. 2016. № 5. С. 49–59.
  21. *Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К.* Гидрогеохимические особенности состава азотных гидротерм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 5. С. 647–664.
  22. *Солотчин П.А., Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Маркова Ю.Н.* Карбонатная седиментация в малых минеральных озерах Западного Забайкалья: отклик на изменения климата голоцена // ДАН. 2017. Т. 473. № 6. С. 703–708.
  23. *Хахинов В.В., Намсараев Б.Б., Доржиева С.С., Бурюхаев С.П.* Гидрохимическая и микробиологическая характеристики болотных экосистем перешейка полуострова Святой Нос (озеро Байкал) // География и природ. ресурсы. 2012. № 4. С. 65–71.
  24. *Шварцев С.Л.* Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами: Обзор // Геология и геофизика. 1991. № 12. С. 16–50.
  25. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
  26. *Kimura K.* Mechanism of the forming of ground water wits high content of sodium bicarbonate onto the plains part of the formation Kobe (Japan) // J. Ground Water Hydrol. 1992. V. 32 (1). P. 5–16.

## СОРБЦИОННО-ДЕСОРБЦИОННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СТОКА РАСТВОРЕННЫХ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА ГЕОХИМИЧЕСКОМ БАРЬЕРЕ РЕКА–МОРЕ (ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)<sup>1</sup>

© 2021 г. А. В. Савенко<sup>a, \*</sup>, В. С. Савенко<sup>a</sup>, О. С. Покровский<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050 Россия

<sup>c</sup>Институт экологических проблем Севера УрО РАН, Архангельск, 163000 Россия

\*e-mail: Alla\_Savenko@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.01.2020 г.

После доработки 09.06.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Использована оригинальная методика экспериментального моделирования сорбционно-десорбционной трансформации микроэлементного состава поглощенного комплекса твердых веществ речного стока при взаимодействии с морской водой. По результатам экспериментов сделан вывод, что при смене пресноводных условий на морские происходит десорбция одних микроэлементов и сорбция других. Десорбция увеличивает речной сток в Мировой океан растворенных форм марганца, кобальта, никеля, кадмия, таллия и бария соответственно на 102, 21.2, 4.0, 16.2, 4.8 и 21.1%, тогда как сорбция приводит к снижению глобального речного стока растворенных свинца и цезия на 9.4 и 2.6%.

**Ключевые слова:** поглощенный комплекс, растворенные микроэлементы, сорбционно-десорбционные процессы, речной сток, морская вода.

**DOI:** 10.31857/S0321059621020152

Как известно, при смешении речных и морских вод в устьевых областях рек происходит значительная химическая трансформация материкового стока растворенных веществ. Одной из основных причин этого явления считают изменение сорбционно-десорбционного баланса в результате проникновения в морскую среду терригенного материала, равновесного с маломинерализованными речными водами [1]. При этом одни химические элементы, находящиеся в поглощенном (адсорбционном) комплексе твердых веществ речного стока, при смене пресноводных условий на морские десорбируются и переходят в растворенное состояние, тогда как другие, присутствующие в значительных количествах в морской воде, наоборот, сорбируются и формируют новый, морской состав поглощенного комплекса. Помимо смещения сорбционно-десорбционного равновесия, в химической трансформации стока растворенных веществ важную роль играют продукционно-деструкционные процессы, коагуляция и флокуляция, растворение–осаждение

твердых фаз, массоперенос на границах вода–дно и вода–воздух. Все эти процессы протекают одновременно, поэтому по данным натурных наблюдений очень сложно количественно оценить вклад каждого из них в отдельности. В связи с этим особое значение приобретают методы экспериментального моделирования, позволяющие элиминировать влияние побочных факторов.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном определении интегрального баланса сорбционно-десорбционной трансформации микроэлементного состава поглощенного комплекса речных взвесей при их поступлении в морские бассейны с водами нормальной солености (35‰). Трансформация состава поглощенного комплекса может сильно меняться – вплоть до изменения направления процесса – в зависимости от текущей величины солености, т.е. долей речной и морской воды в зоне смешения. Рассматриваемый в настоящей статье интегральный баланс сорбционно-десорбционной трансформации соответствует разности содержаний сорбированных компонентов в пресных речных водах и морской воде нормальной солености.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-05-00802).

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводили по разработанной ранее методике [5–7], позволяющей максимально приблизить условия экспериментального моделирования сорбционно-десорбционной трансформации состава поглощенного комплекса твердых веществ речного стока при взаимодействии с морской водой к реальным условиям протекания этого процесса в зоне смешения речных и морских вод. Суть указанной методики состоит в следующем. Навеску твердой фазы (твердых веществ речного стока) приводят в состояние сорбционного равновесия с пресной водой – аналогом речного стока, после чего 1/3 отстоявшегося равновесного раствора отфильтровывают и разделяют на две аликвоты. В первой аликвоте определяют содержание микроэлементов, которое соответствует исходной равновесной концентрации их растворенных форм в суспензии речная взвесь – пресная вода. Ко второй аликвоте добавляют искусственную морскую воду соленостью 105‰ в количестве 1/2 от ее объема. Полученный раствор “А” имеет соленость 35‰, и его состав отражает интегральный результат химической трансформации речного стока растворенных веществ при их проникновении в морской бассейн (к таким процессам относятся, в частности, коагуляция и флоккуляция).

К оставшейся равновесной суспензии, из которой было изъято 1/3 жидкой фазы, добавляют соответствующее количество – 105‰ искусственной морской воды так, чтобы конечная соленость этого раствора “В” была равной 35‰. Состав раствора “В” обусловлен как изменением состава растворенных веществ речного стока, так и трансформацией состава поглощенного комплекса. Очевидно, что разность составов растворов “В” и “А” соответствует интегральному балансу сорбционно-десорбционной трансформации поглощенного комплекса речного стока твердых веществ.

В экспериментах в качестве аналогов твердых веществ речного стока было использовано 5 образцов пресноводных донных отложений, предварительно отмытых дистиллированной водой от поровых растворов: ил темно-серый (ручей, Нижегородская область), 2 образца заиленного песка (реки Ремна и Сейма там же) и 2 образца ила бурого опесчаненого (оз. Песьво, Тверская область).

В пластиковые емкости помещали по 15 г воздушно сухих осадков и добавляли туда по 150 мл воды из Можайского водохранилища, отфильтрованной через запаренный плотный бумажный фильтр и содержащей, мг-экв/л:  $\text{Na}^+ - 0.43$ ,  $\text{K}^+ - 0.05$ ,  $\text{Mg}^{2+} - 0.61$ ,  $\text{Ca}^{2+} - 1.50$ ,  $\text{Cl}^- - 0.12$ ,  $\text{SO}_4^{2-} - 0.28$ ,  $\text{HCO}_3^- - 2.05$ . Суспензии в течение 8 ч барбо-

тировали воздухом и 16 ч выдерживали без перемешивания для осаждения тонкодисперсной взвеси. Этого времени было достаточно для установления сорбционного равновесия между водой Можайского водохранилища и пресноводными отложениями. Далее из каждой пластиковой емкости отбирали по 50 мл отстоявшегося раствора и отфильтровывали его через мембранный фильтр 0.22 мкм. К 40 мл фильтрата добавляли 20 мл искусственной морской воды соленостью 105‰, в которой содержание солей было изменено таким образом, чтобы при смешении с водой из Можайского водохранилища в пропорции 1:2 состав смеси соответствовал нормальной морской воде соленостью 35‰ [4]. Искусственная морская вода соленостью 105‰ содержала, мг-экв/л:  $\text{Na}^+ - 1436.7$ ,  $\text{K}^+ - 31.3$ ,  $\text{Mg}^{2+} - 326.9$ ,  $\text{Ca}^{2+} - 61.6$ ,  $\text{Cl}^- - 1683.4$ ,  $\text{SO}_4^{2-} - 173.2$ . Затем полученные растворы еще раз фильтровали через мембранный фильтр 0.22 мкм в полипропиленовые флаконы с предварительно внесенными туда аликвотами 5N азотной кислоты марки ос.ч. (0.25 мл на 10 мл раствора). К оставшимся 100 мл воды из Можайского водохранилища с 15 г осадков добавляли по 50 мл морской воды соленостью 105‰ и при непрерывном барботаже воздухом (также ~8 ч) доводили суспензии до равновесного состояния. После этого растворы отфильтровывали через мембранный фильтр 0.22 мкм в полипропиленовые флаконы с аналогичной консервацией 5N азотной кислотой. Таким образом, для каждого образца было получено 2 раствора с одинаковой соленостью 35‰. Первый раствор соответствовал простому смешению пресной и морской воды, тогда как состав второго был изменен в результате взаимодействия с твердой фазой. Разность концентраций растворенных компонентов во втором и первом растворах количественно характеризует смещение сорбционно-десорбционного равновесия при переходе твердой фазы из пресноводной среды в морскую.

Концентрации растворенных микроэлементов определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе “Agilent 7500se” с относительной погрешностью  $\pm 3\%$ . Для оценки воспроизводимости анализов использовали международные стандарты речной воды SLRS-4 и SLRS-5 и стандарт воды из эстуария с соленостью 15‰ SLEW-3, расхождение измеренных и сертифицированных концентраций для которых  $\leq 20\%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены в табл. 1. Во-первых, необходимо отметить для всех изученных микроэлементов усиление эффекта сорбционно-десорбционных процессов при пе-

**Таблица 1.** Сорбционно-десорбционный баланс растворенных микроэлементов при взаимодействии пресноводного терригенного материала с морской водой

Твердая фаза	Равновесная концентрация, мкг/л		Разность концентраций $C_i - C_i^*$ , мкг/л	Сорбция (+) или десорбция (-) $\Gamma_i$ , мкг/г (г/г)
	смещение в отсутствие твердой фазы $C_i$	смещение при наличии твердой фазы $C_i^*$		
<b>Марганец</b>				
Нижегородская обл.				
ил темно-серый, ручей	1540	17780	-16240	-162.4
заиленный песок, р. Ремна	120	1770	-1650	-16.5
то же, р. Сейма	80	260	-180	-1.8
Тверская обл.				
ил бурый опесчаненый, оз. Песьво, образец 1	680	13140	-12460	-124.6
то же, образец 2	880	17110	-16230	-162.3
Среднее				-93.5
<b>Кобальт</b>				
Нижегородская обл.				
ил темно-серый, ручей	1.91	22.15	-20.24	-0.202
заиленный песок, р. Ремна	0.51	3.70	-3.19	-0.032
то же, р. Сейма	0.94	6.47	-5.53	-0.055
Тверская обл.				
ил бурый опесчаненый, оз. Песьво, образец 1	1.25	8.81	-7.56	-0.076
то же, образец 2	2.13	8.86	-6.73	-0.067
Среднее				-0.086
<b>Никель</b>				
Нижегородская обл.				
ил темно-серый, ручей	13.92	35.28	-21.36	-0.214
заиленный песок, р. Ремна	0.71	2.27	-1.56	-0.016
то же, р. Сейма	1.97	2.88	-0.91	-0.009
Тверская обл.				
ил бурый опесчаненый, оз. Песьво, образец 1	7.21	17.59	-10.38	-0.104
то же, образец 2	16.59	24.95	-8.36	-0.084
Среднее				-0.085
<b>Кадмий</b>				
Нижегородская обл.				
ил темно-серый, ручей	0.14	7.54	-7.40	-0.074
заиленный песок, р. Ремна	0.13	2.03	-1.90	-0.019
то же, р. Сейма	0.32	0.72	-0.40	-0.004
Тверская обл.				
ил бурый опесчаненый, оз. Песьво, образец 1	0.22	2.61	-2.39	-0.024
то же, образец 2	0.40	5.65	-5.25	-0.052
Среднее				-0.035

Таблица 1. Окончание

Твердая фаза	Равновесная концентрация, мкг/л		Разность концентраций $C_i - C_i^*$ , мкг/л	Сорбция (+) или десорбция (-) $\Gamma_i$ , мкг/г (г/г)
	смещение в отсутствие твердой фазы $C_i$	смещение при наличии твердой фазы $C_i^*$		
<b>Галлий</b>				
Нижегородская обл.				
ил темно-серый, ручей	0.07	0.50	-0.43	-0.0043
заиленный песок, р. Ремна	0.01	0.10	-0.09	-0.0009
то же, р. Сейма	<0.01	0.07	-0.07	-0.0007
Тверская обл.				
ил бурый опесчаненый, оз. Песьво, образец 1	0.03	0.40	-0.37	-0.0037
то же, образец 2	0.01	0.33	-0.32	-0.0032
Среднее				-0.0026
<b>Свинец</b>				
Нижегородская обл.				
ил темно-серый, ручей	5.05	0.92	4.13	0.041
заиленный песок, р. Ремна	3.08	2.44	0.64	0.006
то же, р. Сейма	3.22	2.17	1.05	0.010
Тверская обл.				
ил бурый опесчаненый, оз. Песьво, образец 1	3.16	0.92	2.24	0.022
то же, образец 2	3.39	1.45	1.94	0.019
Среднее				0.020
<b>Цезий</b>				
Нижегородская обл.				
ил темно-серый, ручей	0.198	0.044	0.154	0.0015
заиленный песок, р. Ремна	0.099	0.039	0.060	0.0006
то же, р. Сейма	0.080	0.024	0.056	0.0006
Тверская обл.				
ил бурый опесчаненый, оз. Песьво, образец 1	0.063	0.005	0.058	0.0006
то же, образец 2	0.085	0.007	0.078	0.0008
Среднее				0.0008
<b>Барий</b>				
Нижегородская обл.				
ил темно-серый, ручей	32	1650	-1618	-16.2
заиленный песок, р. Ремна	32	1090	-1058	-10.6
то же, р. Сейма	64	1100	-1036	-10.4
Тверская обл.				
ил бурый опесчаненый, оз. Песьво, образец 1	66	1450	-1384	-13.8
то же, образец 2	87	1510	-1423	-14.2
Среднее				-13.0

**Таблица 2.** Вклад сорбционно-десорбционных процессов в трансформацию стока растворенных микроэлементов на геохимическом барьере река–море

Элемент	Концентрация в речном стоке, мкг/л [8]	Сток растворенных форм в океан, тыс. т/год*	Сорбция (+) или десорбция (–)		Вклад сорбции–десорбции, % от стока в океан
			$\Gamma_i$ , г/т	$q_i$ , тыс. т/год	
Mn	34	1420	–93.5	–1450	102
Co	0.15	6.26	–0.086	–1.33	21.2
Ni	0.80	33.4	–0.085	–1.32	4.0
Cd	0.08	3.34	–0.035	–0.54	16.2
Pb	(0.02)	0.83	–0.0026	–0.040	4.8
Pb	0.079	3.29	+0.020	+0.31	–9.4
Cs	0.011	0.46	+0.0008	+0.012	–2.6
Ba	23	959	–13.0	–202	21.1

\* Объем водного стока в Мировой океан принят равным  $41700 \text{ км}^3/\text{год}$  [3].

реходе от грубозернистых осадков (заиленные пески) к тонкозернистым (илы). Это соответствует известной закономерности увеличения удельной сорбционной емкости твердых фаз по мере возрастания степени их дисперсности и, следовательно, удельной площади поверхности. Во-вторых, проведенные эксперименты позволяют приближенно оценить роль сорбционно-десорбционных процессов в трансформации стока растворенных микроэлементов на геохимическом барьере река–море. Для этого сравним абсолютные массы микроэлементов, поступающих в океан с речным стоком, с таковыми, переходящими в раствор или, наоборот, удаляемыми из него в результате изменения состава поглощенного комплекса при проникновении твердых веществ речного стока в морскую среду.

Наиболее обоснованная масса речного стока твердых веществ составляет 15.5 млрд т/год [2]. Используя эту величину и приведенные в табл. 1 средние значения удельной сорбции или десорбции микроэлементов  $\Gamma_i$ , можно рассчитать общее количество  $q_i$  сорбированного или десорбированного микроэлемента  $i$  в зоне смешения речных и морских вод:

$$q_i = 15.5 \times 10^9 \Gamma_i, \text{ т/год.}$$

Результаты расчета сорбционно-десорбционного баланса микроэлементов приведены в табл. 2. Там же содержатся сведения о глобальном речном стоке растворенных форм изученных микроэлементов, рассчитанном по данным [8] об их среднем содержании в речных водах.

Из табл. 2 следует, что при смене пресноводных условий на морские происходит десорбция марганца, кобальта, никеля, кадмия, таллия и бария в количестве соответственно 102, 21.2, 4.0, 16.2, 4.8 и 21.1% выноса растворенных форм этих элементов в океан без учета трансформации на

геохимическом барьере река–море. Свинец и цезий, напротив, сорбируются и удаляются из раствора, в результате чего глобальный сток их растворенных форм снижается на 9.4 и 2.6%.

Таким образом, сорбционно-десорбционные процессы, протекающие в зоне смешения речных и морских вод, приводят к значимым изменениям поступления растворенных форм рассмотренных микроэлементов в океан и служат существенным фактором формирования эколого-токсикологического состояния вод устьевых областей рек.

Приведенные оценки интегрального баланса микроэлементов в поглощенном комплексе речных взвесей на геохимическом барьере река–море, несомненно, имеют сугубо ориентировочный характер, и более определенные выводы могут быть получены при использовании образцов твердой фазы, соответствующих среднему составу мирового речного стока твердых веществ.

## ВЫВОДЫ

Предложенная методика экспериментального моделирования сорбционно-десорбционной трансформации микроэlementного состава поглощенного комплекса твердых веществ речного стока в зоне смешения речных и морских вод позволяет изучать этот процесс в условиях, максимально приближенных к природным.

При проникновении твердых веществ речного стока в морскую среду происходит десорбция марганца, кобальта, никеля, кадмия, таллия и бария, составляющая соответственно 102, 21.2, 4.0, 16.2, 4.8 и 21.1% поступления растворенных форм этих элементов в Мировой океан без учета трансформации на геохимическом барьере река–море. Свинец и цезий, наоборот, сорбируются и удаляются из раствора, что приводит к снижению глобального стока их растворенных форм на 9.4 и 2.6%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гордеев В.В.* Геохимия системы река–море. М., 2012. 452 с.
2. *Дедков А.П., Мозжерин В.И., Сафина Г.Р., Гусаров А.В.* Глобальный сток наносов и его изменчивость // Университеты России – фундаментальные исследования. География. Материалы Всерос. науч. конф. М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 70.
3. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 636 с.
4. *Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М.* Морская вода. М.: Наука, 1979. 327 с.
5. *Савенко А.В.* Трансформация стока ионов аммония в зоне смешения речных и морских вод под влиянием сорбционно-десорбционных процессов // Экологические проблемы. Взгляд в будущее. Сб. тр. VIII Международ. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. С. 360–362.
6. *Савенко А.В.* Роль процессов десорбции в трансформации стока растворенного бария в зоне смешения речных и морских вод (по данным экспериментального моделирования) // ДАН. 2019. Т. 487. № 5. С. 551–553.
7. *Савенко А.В., Савенко В.С.* Химическая трансформация поглощенного комплекса материкового стока твердых веществ на геохимическом барьере река–море (по данным экспериментального моделирования) // Геохимия. 2020. Т. 65. № 1. С. 101–104.
8. *Gaillardet J., Viers J., Dupre B.* Trace elements in river waters // Treatise Geochem. Second edition. Ch. 7. Amsterdam: Elsevier, 2014. P. 195–235.

## НИТРОЗАМИНЫ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: ИСТОЧНИКИ, ОБРАЗОВАНИЕ, ТОКСИЧНОСТЬ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК (ОБЗОР) 2. СОДЕРЖАНИЕ В ГИДРОБИОНТАХ, БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ И ОЦЕНКА РИСКА<sup>1</sup>

© 2021 г. И. И. Руднева<sup>a, \*</sup>, С. О. Омельченко<sup>b, \*\*</sup>

<sup>a</sup>ФИЦ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН,  
Севастополь, 229011 Россия

<sup>b</sup>Крымский республиканский институт постдипломного педагогического образования,  
Симферополь, 295000 Россия

\*e-mail: svg-41@mail.ru

\*\*e-mail: svet.omelchenko@mail.ru

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.

После доработки 13.05.2020 г.

Принята к публикации 09.06.2020 г.

Природные и антропогенные процессы способствуют образованию избыточных концентраций соединений азота в биосфере, которые в результате химических реакций способны приводить к синтезу нитрозаминов. Нитрозамины – токсичные соединения, проявляющие канцерогенные, мутагенные и тератогенные свойства и оказывающие негативное действие на живые организмы. Представлены данные о содержании этих веществ в водных организмах, прежде всего в рыбах, зависимость их накопления в гидробионтах от сезонных факторов, видовых и биологических особенностей рыб, а также от условий среды обитания, включая антропогенную нагрузку. Приведены примеры проявления канцерогенных, мутагенных и токсических свойств нитрозаминов у водных и наземных организмов. Показаны способы и методы оценки экологического риска нитрозаминов в природной среде и в гидробионтах, а также опасность для здоровья человека.

*Ключевые слова:* нитроамины, рыбы, биологические эффекты, загрязнение, экологический риск.

DOI: 10.31857/S0321059621020139

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение процессов, лежащих в основе важнейших биогеохимических циклов в биосфере, и увеличение содержания в атмосфере окислов углерода, серы и азота оказывает существенное модифицирующее влияние на физико-химические свойства воды и ее пригодность для использования как в питьевых целях, так и для нормального существования гидробионтов. Избыточные концентрации азотсодержащих соединений в гидросфере, обусловленные природными процессами и антропогенной деятельностью, приводят к возникновению таких путей трансформации азота, в результате которых образуются вещества с токсичными свойствами [12]. К ним относятся, в

частности, нитроамины (НА), характеризующиеся высокой химической стабильностью, устойчивостью к температуре и к свету, поэтому не подвергающиеся деградации и сохраняющиеся в окружающей среде в неизменном виде длительное время.

Эти соединения присутствуют в живых организмах вследствие попадания туда с пищей, водой, воздухом, а также они образуются там в результате нитрификации аммонийного азота микроорганизмами кишечника. В настоящее время повышенное внимание к НА обусловлено их выраженными канцерогенными и мутагенными эффектами [3, 42]. Оценка содержания НА в окружающей среде и в организмах важна при контроле качества водных биологических ресурсов и продуктов, которые из них получают [2, 47]. В связи с этим исследование круговорота азота в биосфере и путей образования НА, их накопления и образования в гидробионтах – актуальное направление водной экологии, оно включает в себя несколько аспектов: исследование содержа-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ “Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского” РАН (тема “Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом”, государственная регистрация АААА-А18-118021490093-4).

**Таблица 1.** Содержание НА в мышечных тканях рыб разных экологических групп, обитающих в Черном море (нг/кг,  $\bar{x} \pm S\bar{x}$ ) [15, 18]

Виды	НА, пределы содержания	НА, ( $\bar{x} \pm S\bar{x}$ )
Костистые рыбы		
Налим	0.20–2.00	1.10 ± 0.10
Скорпена	0.45–3.00	1.50 ± 0.20
Бычок-мартовик	0.25–2.90	1.60 ± 0.20
Бычок-кругляк	0.2–3.00	1.70 ± 0.20
Мерланг	0.20–2.00	1.00 ± 0.20
Барабуля	0.20–1.70	1.00 ± 0.10
Зеленушка	1.00–1.80	1.00 ± 0.10
Смарида	0.90–1.50	0.85 ± 0.10
Звездочет	0.15–1.30	0.86 ± 0.10
Темный горбыль	0.40–0.60	0.50 ± 0.07
Ставрида	0.20–1.60	0.70 ± 0.10
Кефаль	0.20–0.30	0.25 ± 0.04
Хрящевые рыбы		
Катран	1.50–1.70	1.60 ± 0.10
Морской кот	1.80–1.90	1.90 ± 0.40
Морская лисица	1.90–2.00	1.80 ± 0.10

ния и путей трансформации НА в живых организмах;

изучение процессов образования и трансформации НА в гидробионтах и передача по пищевым цепям;

анализ содержания НА в различных водных организмах, в том числе употребляемых в пищу человеком, с целью оценки экологического риска и последствий для здоровья;

изучение взаимосвязи между уровнем эвтрофирования среды, экзогенным образованием НА и эндогенным синтезом в гидробионтах;

изучение метаболизма НА в пресных и морских акваториях, а также процессов образования, биотрансформации и их выведения у гидробионтов.

Цель настоящей работы заключалась в анализе путей поступления НА в водные организмы, выявлении зависимости их накопления в гидробионтах от абиотических, биотических и антропогенных факторов и в определении экологического риска для природных процессов и ресурсов, биоты и здоровья человека.

### ИССЛЕДОВАНИЕ НИТРОЗАМИНОВ В РЫБАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

В организм высших животных и человека нитросоединения (НС) попадают из экзогенных источников (пищи, воды, воздуха) и образуются в результате нитрификации аммонийного азота микроорганизмами кишечника. В настоящее

время определение НА в гидробионтах обязательно для оценки их качества и пригодности для пищи человека [17, 24, 29]. Многочисленные исследования, проведенные на разных водных организмах в различных географических районах, показывают существенные вариации содержания НА в биоте. Концентрация этих компонентов в различных видах рыб, отловленных в водоемах Китая, варьировала в пределах 0.01–0.1 мкг/кг массы. При этом пресноводные рыбы содержали меньше НА, чем морские виды [48]. У 145 видов рыб, употребляемых в пищу в Китае, содержание НА колебалось от 0.028 до 4.54 мкг/кг. Рыбы, обитающие в более загрязненных водоемах, имели большие концентрации НА. В тканях сайды, отловленной в водах Аляски, содержание НА составило 0.01 мкг/кг в пересчете на N-нитроздипропиламин. Однако при высушивании рыбы концентрация НА увеличивалась в 15.5 раз, что вызывает определенные опасения для использования этого продукта в качестве пищи в связи с его потенциальной канцерогенной опасностью [45].

Исследования на черноморских видах рыб позволили установить определенные различия содержания НА в их тканях в зависимости от филогенетического положения (табл. 1), принадлежности рыб к определенной экологической группе (рис. 1), сезонных колебаний и условий существования.

Содержание НА в мышечных тканях костистых рыб колеблется от 1.70 (у бычка-кругляка) до

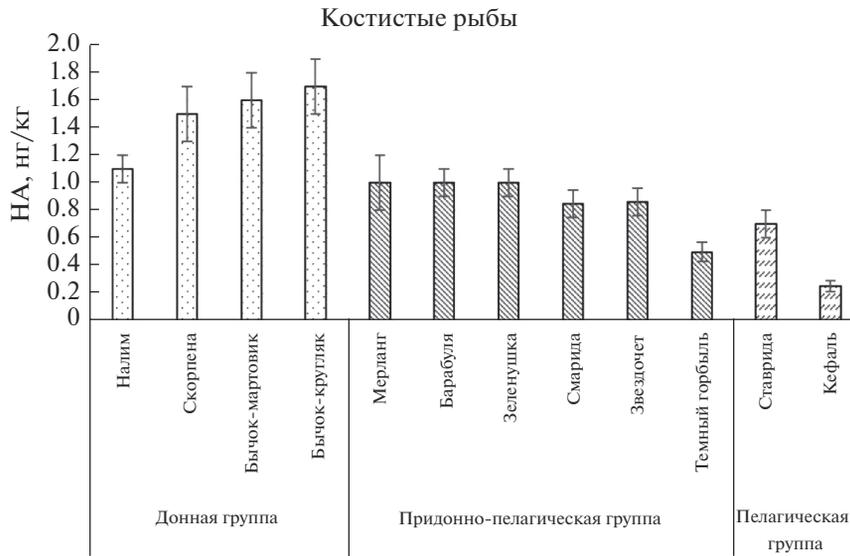


Рис. 1. Содержание НА в мышечных тканях некоторых видов черноморских костистых рыб ( $\bar{x} \pm Sx$ ) [15, 18, 29].

2.50 нг/кг (у кефали), тогда как в тканях хрящевых рыб содержание – 1.50–2.00 нг/кг (табл. 1). Усредненное содержание НА в мышечных тканях хрящевых рыб ( $x_{cp} = 1.80$  нг/кг) выше, чем у костистых рыб ( $x_{cp} = 1.00$  нг/кг). Самые высокие показатели отмечены у донных хищников – морского кота и морской лисицы [43], что может быть обусловлено специфичным азотистым обменом этих форм, конечный продукт которого – мочевины. Ее концентрация в тканях хрящевых рыб нередко >2% и служит для осморегуляционных целей. Для поддержания осмотического баланса у скатов присутствуют и другие азотсодержащие компоненты с низкой молекулярной массой – триметиламиноксид и бетаин [36]. Таким образом, насыщение тканей хрящевых рыб азотсодержащими компонентами может способствовать вовлечению их в реакции образования НА по специфическим метаболическим путям, присущим эласмобранхиям. Помимо этого, морской кот и морская лисица, в отличие от катрана, являются донными рыбами, которые в наибольшей степени подвержены действию загрязнителей, сконцентрированных в придонных слоях воды, в том числе биогенов и других токсикантов, способствующих образованию НА в организме рыб, что также отмечено и для костистых рыб (рис. 1).

Содержание НА в мышечных тканях костистых рыб имеет четко выраженную зависимость от экологической группы, к которой принадлежит вид (рис. 1), и варьирует в значительных пределах (табл. 1), нг/кг: придонная группа – 0.20–0.30 ( $x_{cp} = 1.30$ ); у придонно-пелагической группы – 0.15–2.00 ( $x_{cp} = 1.00$ ); у пелагических рыб – 0.20–1.60 ( $x_{cp} = 0.60$ ). Таким образом, у придонных видов содержание НА значительно

выше, чем у придонно-пелагических и пелагических форм. Пелагические и придонно-пелагические виды способны мигрировать из эвтрофированных сильно загрязненных районов, что снижает вероятность образования НА. Повышенное содержание НА в тканях донных форм может быть вызвано условиями обитания в более загрязненных придонных слоях воды, непосредственно соприкасающихся с грунтами, где аккумулируются загрязнители [20, 21]. Помимо этого, донные формы питаются бентосными беспозвоночными, и накопление НА в их тканях может происходить за счет эффекта концентрирования [46].

В то же время большая вариабельность содержания НА в тканях костистых рыб обусловлена их биологическими и видовыми особенностями (образ жизни, подвижность, спектр питания). В отличие от придонных видов, ведущих малоподвижный образ жизни, концентрация НА в мышечных тканях пелагических и придонно-пелагических рыб заметно ниже, что может быть следствием более интенсивного метаболизма, свойственного активному образу жизни.

Видовые особенности содержания НА у исследуемых рыб могут быть связаны с особенностями трансформации этих соединений в печени рыб, клетки которой очень чувствительны к ним [8, 22]. В этом процессе определенную роль играет и алиментарный фактор, а также состояние гепатоцитов и степень активности монооксигеназ печени. Интоксикация этими соединениями приводит к нарушению функционирования монооксигеназ и к снижению синтеза цитохрома P-450 как следствие трех взаимосвязанных процессов: включение НА в метаболические пути организма ингибирует активность цитохрома P-450, угнета-

**Таблица 2.** Сезонная динамика содержания НА в мышечных тканях рыб (нг/кг,  $\bar{x} \pm S\bar{x}$ ) [15, 29])

Вид	Сезон			
	Зима	Весна	Лето	Осень
Придонная группа				
Налим	1.70 ± 0.2	0.45 ± 0.02	0.10 ± 0.01	1.80 ± 0.04
Скорпена	1.80 ± 0.3	1.00 ± 0.1	0.45 ± 0.04	2.90 ± 0.09
Бычок-мартовик	1.80 ± 0.1	0.85 ± 0.1	0.31 ± 0.06	2.70 ± 0.09
Бычок-кругляк	1.50 ± 0.1	1.20 ± 0.1	0.20 ± 0.05	2.70 ± 0.20
Придонно-пелагическая группа				
Мерланг	1.30 ± 0.1	0.70 ± 0.02	0.10 ± 0.01	1.90 ± 0.07
Барабуля	1.50 ± 0.1	1.00 ± 0.1	0.10 ± 0.01	1.60 ± 0.20
Зеленушка	1.60 ± 0.3	1.00 ± 0.1	—	1.70 ± 0.09
Смарида	1.30 ± 0.1	1.00 ± 0.02	—	1.00 ± 0.10
Звездочет	1.00 ± 0.3	0.90 ± 0.09	0.15 ± 0.01	1.40 ± 0.09
Пелагическая группа				
Ставрида	0.75 ± 0.09	0.5 ± 0.08	0.2 ± 0.04	1.5 ± 0.07

ет его биосинтез и при взаимодействии с биомолекулами приводит к их повреждению. Они стимулируют перекисное окисление липидов в печени, что усиливает токсический эффект этих канцерогенов [3]. Таким образом, острый токсический эффект НА связан прежде всего с поражением систем детоксикации в клетках печени.

В группе придонных рыб содержание НА имеет близкие и самые высокие значения у бычков и морского ерша, но у звездочета этот показатель в 2 раза ниже. Все исследуемые виды рыб этой группы ведут сходный образ жизни и имеют одинаковый спектр питания, включающий мелкую рыбу, ракообразных и червей. Однако особенность звездочета — его крайне малоподвижный образ жизни, при котором он предпочитает зарываться в песок и длительно поджидать добычу. В этом случае его контакты с загрязненной биогенами водой сокращаются и, таким образом, снижается их поступление в организм рыбы по сравнению с другими представителями этой группы, которые предпочитают держаться на поверхности дна.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что образ жизни, степень подвижности и спектр питания рыб могут оказывать существенное влияние на содержание данных канцерогенов в морских рыбах. В то же время накопление НА в тканях рыб и других гидробионтов зависит также от экзогенных факторов, в частности от сезонных изменений среды обитания и антропогенного воздействия на нее.

Учитывая тот факт, что НА и их предшественники — соединения азота — могут образовываться в среде и из нее попадать в организмы, а также синтезироваться в них, особое значение приобре-

тают исследования, направленные на анализ трансформации этих компонентов в среде и в гидробионтах и факторов, влияющих на эти процессы. НА образуются в большом количестве в сильно эвтрофированных водоемах, включая морскую среду, куда поступают хозяйственно-бытовые сточные воды, содержащие в высоких концентрациях биогены. В результате интенсивного развития бактерий, способных синтезировать НА, они накапливаются в среде, в беспозвоночных и по пищевым цепям попадают в организм рыб, где аккумулируются в органах и тканях.

Синтез этих канцерогенов в водоемах имеет определенную цикличность и совпадает с основными процессами трансформации азота в среде, а именно: аммонификация—нитрификация—денитрификация. Появляются промежуточные формы соединений азота, которые вступают в реакцию с аминами с образованием НА. В трансформации соединений азота в воде важную роль играют микроорганизмы, входящие в состав фитопланктона. Динамика и интенсивность этих процессов тесно связаны с сезонностью. Наиболее интенсивное развитие фитопланктона происходит летом, а осенью его численность и биомасса снижаются [9, 40]. Процессы разложения фитопланктона, происходящие в осенний период, сопровождаются насыщением среды соединениями азота, что отразилось на концентрациях НА в тканях исследованных черноморских рыб (табл. 2).

Содержание НА в них имело выраженную сезонную динамику: в период зима—весна—лето при повышении температуры воды происходило снижение концентрации НА в тканях, но осенью — рост. Содержание НА в организме рыб в значительной степени зависит от температуры,

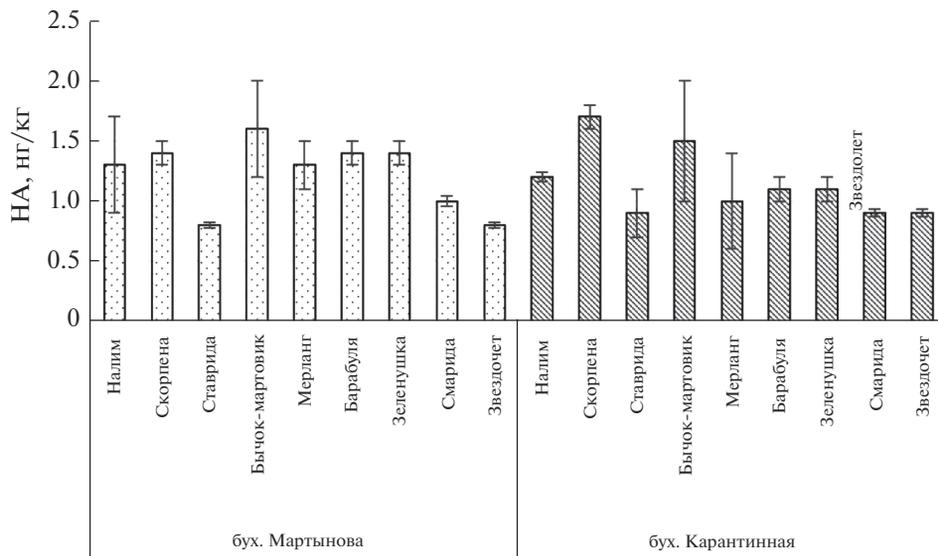


Рис. 2. Содержание НА в мышечных тканях рыб, обитающих в двух бухтах в районе Севастополя (нг/кг),  $\bar{x} \pm S\bar{x}$  [15, 18, 29].

влияющей на уровень метаболизма. С повышением температуры воды скорость биохимических реакций возрастает, что уменьшает возможность накопления НА и способствует их более быстрому выведению из организма. Для холодного времени года установлена противоположная тенденция [16, 23, 43]. Таким образом, динамика содержания этих НА у исследуемых видов рыб, характеризующаяся резким повышением уровня НА осенью и снижением весной—летом, связана с изменением концентрации азотистых соединений в среде и с численностью фитопланктона. Летом при интенсивном развитии фитопланктона происходит утилизация азотистых компонентов микроводорослями [10, 11] и снижается образование НА в среде и в рыбах. Осенью сокращение численности фитопланктона и его отмирание способствуют насыщению воды соединениями азота, трансформация которых в воде приводит к образованию НА и их предшественников. Они попадают в организм и там подвергаются последующему метаболизму с образованием эндогенных НА, концентрация которых в водной среде  $>0.01$  мкг/л представляет реальную угрозу для здоровья рыб [16, 17, 19–21, 39]. В этот же период в тканях рыб обнаружены максимальные концентрации НА.

Помимо этого, для теплого времени года характерна высокая степень насыщения поверхностных вод кислородом, тогда как содержание кислорода в придонном слое снижено. Образование НА под действием солнечного света возможно в воде с низким содержанием кислорода, поскольку последний ускоряет фотодegradацию НС и их распад под действием солнечного УФ-излу-

чения, что также приводит к снижению концентрации этих компонентов как в воде, так и в рыбах.

На содержание НА в тканях черноморских рыб влияет также уровень загрязнения среды обитания. Как показали исследования авторов статьи, концентрация НА в мышечных тканях рыб, обитающих в бухтах Карантинной и Мартынова в районе Севастополя с разной степенью антропогенной нагрузки, существенно различалась (рис. 2). Содержание НА у большинства исследованных видов, обитающих в бух. Карантинной, превосходило соответствующие показатели в тканях этих видов в бух. Мартынова, что особенно было выражено у донных и придонно-пелагических форм [13, 16, 23, 25]. Это может зависеть как от степени антропогенной нагрузки, так и от естественных факторов, в частности от географического положения бухт и их водообмена. По данным Государственной инспекции охраны Черного моря [17, 43], уровень содержания  $\text{NO}_2$  и  $\text{NH}_3^+-\text{N}$  в бухтах Мартынова и Карантинной был приблизительно одинаков (0.03 и 0.04 мг/л соответственно). Карантинная бухта подвержена хроническому загрязнению, однако имеет постоянный обмен с открытой частью моря; бух. Мартынова изолирована искусственным молотом от моря, что способствует снижению водообмена в данной акватории, тогда как в бух. Карантинной застойные явления и эвтрофирование менее выражены.

Таким образом, на содержание НА в мышечных тканях рыб могут влиять сезонные факторы, особенности их биологии, а также уровень загрязнения среды обитания, в частности степень эвтрофирования вод, меняющаяся по сезонам.

Хотя содержание НА в тканях массовых видов черноморских рыб, отловленных в прибрежной зоне Севастополя, не превышало ПДК, присутствие этих соединений даже в незначительных количествах может отрицательно повлиять на здоровье как рыб, так и их потребителей, включая человека. Это особенно касается использования в пищу таких промысловых видов, как катран, ставрида, смарида, горбыль и в меньшей степени бычков и морского ерша, которые, однако, содержат наибольшее количество НА.

### БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ НИТРОЗАМИНОВ

Азотсодержащие соединения играют важную роль в образовании канцерогенных НА – группы соединений, потенциально опасных для здоровья не только гидробионтов, но и человека, использующего в пищу водные биологические ресурсы. В настоящее время выявлено >100 НС, обладающих канцерогенным действием.

Экспериментально доказано, что НА индуцируют злокачественные новообразования у большого числа видов животных, относящихся к разным систематическим группам, и, таким образом, являются политропными канцерогенами. Их видовая бластомогенная активность значительно выше, чем у всех других известных химических канцерогенов. Избирательность бластомогенного действия зависит от химической структуры НА, вида животных, их индивидуальной и генетически обусловленной чувствительности, доз канцерогенов и модифицирующих факторов [1]. Индуцированные новообразования очень разнообразны, многие из них характеризуются высокой степенью злокачественности, инфильтративным ростом, метастазированием и по строению и локализации напоминают опухоли человека [6, 26, 28, 31, 32].

НДМА и НДЭА преимущественно вызывают опухоли у различных видов млекопитающих [24, 33, 35]. Несмотря на значительные видовые различия между теплокровными животными (млекопитающие, птицы) и холоднокровными (рыбы и амфибиями), опухоли, индуцируемые у них НА, нередко сходны по локализации и морфологической структуре. НДЭА и НДМА у всех теплокровных животных вызывают опухоли печени – холангио- и гепатоцеллюлярные карциномы. Гепатоцеллюлярные аденомы и опухоли другой локализации развиваются у аквариумных рыб и амфибий при действии различных НС [1, 6, 24, 27, 33, 35]. Опухоли почек крыс часто образуются из эпителия канальцев коркового слоя. В мочевом пузыре новообразования индуцируются N-нитрозодибутиламином (НДБА). Опухоли органов дыхания, пищевода и пищеварительного тракта появляются под влиянием многих НА. Эти кан-

церогены поражают нервную и репродуктивную системы [41]. НА проявляют также мутагенную активность, при этом появившиеся мутации наследуются несколькими поколениями [24]. Тем самым НА оказывают губительное воздействие на организмы, способны модифицировать состояние репродуктивной системы и косвенно изменять динамику численности популяций.

В зависимости от типа НС различны механизмы их действия на живой организм. Негативное действие НА особенно проявляется в эндоплазматическом ретикулуме печени, что приводит к утрате каталитических свойств монооксигеназной системы, угнетает белковый синтез на уровне трансляции [5]. НС негативно влияют на функцию гемоглобина, вызывают метгемоглобинемию и анексию [38]. НА, в частности НДЭА и НДМА, существенно нарушают структуру печени, инициируют дистрофию, некроз паренхимы органа. На более поздних стадиях канцерогенеза возникают доброкачественные аденомы и (или) злокачественные новообразования печени, а также сосудистые опухоли [9]. Наряду с канцерогенным и мутагенным эффектом для них характерен широкий спектр биологического действия, в том числе трансплацентарный эффект, влияние на потомство и т. д. НА токсичны и канцерогенны в присутствии дополнительных ферментных систем, которые всегда имеются в организме теплокровных, а нитрозамиды проявляют эти свойства даже без дополнительной трансформации и поражают в первую очередь кровеносную, лимфоидную, пищеварительную системы. НА на ранних стадиях отравления подавляют иммунитет [8]. Как показано выше, они способны накапливаться в печени и других тканях рыб, что может привести к функциональной недостаточности и к нарушению азотистого обмена. Токсиканты способны нарушать структуру и функции биомолекул, вызывать необратимые изменения ДНК, приводить к патологическим проявлениям и снижению резистентности гидробионтов к изменяющимся условиям среды [7]. N-нитрозометилмочевина и N-нитрозоэтилмочевина влияют на ДНК, что приводит к аномалиям и порокам развития живого организма – недоразвитию конечностей, в ряде случаев к слабому развитию органов. Большинство этих канцерогенов оказывает специфическое действие на определенные органы. При высоких дозах эта специфичность уже не проявляется. Действие частых небольших доз НА более опасно, чем действие однократных больших доз.

Таким образом, НА оказывают прямые и косвенные воздействия на водные экосистемы и их обитателей. Учитывая дальнейшее насыщение гидросферы соединениями азота, остро стоит проблема оценки их опасности как для водных

экосистем и гидробионтов, так и для здоровья людей, использующих ресурсы водных объектов.

### ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА НИТРОЗАМИНОВ

Поскольку НА и их предшественники представляют реальную опасность для здоровья человека и экосистем, для них разработаны специальные нормативы содержания в окружающей среде [14, 30]. Так, ПДК<sub>мр2</sub> нитрата аммония в воздухе населенных пунктов составляет 0.008 мг/м<sup>3</sup>, в воде содержание нитратов не должно превышать 45 мг/дм<sup>3</sup>, в поступающих стоках в источники водоснабжения в результате хозяйственной деятельности — 10 мг/дм<sup>3</sup>, в почве — 130 мг/кг [2, 4]. Многообразие возможных путей проникновения их в водные объекты, в том числе используемые в качестве питьевых резервуаров, их хорошая растворимость, высокая стабильность делают воду одним из основных источников поступления НА в организм человека и животных. Эти соединения широко используются в промышленности, они обнаружены и в машинных маслах (до 3%), а также в пищевых продуктах после их переработки, в которых наиболее часто встречаются нитрозодиметиламин и нитрозодиэтиламин. Доказана возможность их синтеза в природных водоемах, а также в организме человека, они распространены практически во всех объектах окружающей среды. С суточным рационом человек получает ~1 мкг НС, с питьевой водой — 0.01 мкг, с вдыхаемым воздухом — 0.3 мкг.

Содержание НА в пищевой продукции — один из важнейших показателей ее безопасности. Установлено, что с увеличением продолжительности хранения концентрация этих канцерогенов в продуктах питания повышается. Так, на 30-е сут хранения наблюдается превышение гигиенических норм содержания НА в мясной варено-копченой продукции на 30–40%. Допустимые уровни — 0.004 мг на 1 кг морепродуктов. При этом концентрация НА в переработанной рыбе зависит от вида, поскольку содержание вторичных и третичных аминов — предшественников НА — существенно варьирует у разных видов, а также зависит от загрязнения морепродуктов нитрат-редуцирующими бактериями *Staphilococcus aureus* после обработки рыбы при температуре >150°C [47].

Безопасная суточная доза низкомолекулярных НА для человека составляет 10 мкг/сут или 5 мкг/кг в пищевом продукте. Рекомендованная ПДК НС в воде хозяйственно-пищевого назначения — 0.03 мкг/л. Временные гигиенические нормативы установлены также для N-нитрозопиперидина [30].

В настоящее время по-прежнему остается актуальной проблема оценки риска для здоровья людей от содержащихся в водной среде соединений азота [37]. Китайскими исследователями проведена работа по изучению влияния содержания нитратов в грунтовых водах из типичных для восточного Китая карстовых источников в сухой и влажный сезоны года [34]. Риск оценивали по потреблению питьевой воды и по влиянию на кожу у четырех групп людей — младенцев (0–6 мес.), детей (7 мес. — 17 лет), женщин (18 лет и старше) и мужчин (18 лет и старше). Результаты показали, что более 60% тестируемых образцов воды содержали нитраты в концентрации 10 мг/л, что является стандартом для Китая. Исследования показали следующую последовательность риска для изучаемых групп: младенцы > дети > взрослые женщины > взрослые мужчины. При этом опасность была выше во влажный сезон, чем в сухой, что объясняется большим осаждением нитратов во влажное время года. Полученные данные могут быть полезны для разработки менеджмента по водопользованию. Учитывая тот факт, что содержание НА может варьировать в воде и в гидробионтах в течение годового цикла, анализ процессов их образования и накопления в тканях гидробионтов необходим для рационального планирования промысловых мероприятий и добычи водных ресурсов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Насыщение водной среды соединениями азота в результате естественных природных процессов и антропогенного загрязнения может приводить к образованию нитрозаминов, представляющих опасность для водных организмов, так как они обладают выраженными токсическими, мутагенными и канцерогенными свойствами. Эти компоненты могут оказывать как прямое негативное влияние на гидробионтов в результате накопления их в организме, последующей интоксикации, канцерогенеза и нарушения жизненных процессов, так и не прямое вследствие ухудшения экологического состояния среды обитания, что делает ее ресурсы непригодными для нормальной жизнедеятельности биоты и использования человеком. В связи с этим возникает проблема контроля этих соединений в воде и биоресурсах, дальнейшее изучение их опасности для гидробионтов, особенно выращиваемых в искусственных условиях аквакультуры, где достаточно велик поток биогеенов, обусловленный поступлением обогащенных азотом кормов, фармпрепаратов и продуктов жизнедеятельности организмов. Поскольку аквакультура характеризуется быстрыми темпами развития и экономически выгодна, то в ближайшее время этому вопросу следует уделить

особое внимание и прогнозировать риск загрязнения водных объектов биогенами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенеманский В.В., Прусаков В.М., Лещенко М.Е. Изучение бластомогенного действия малых концентраций нитрозодиметиламина, диметиламина и двуокиси азота // *Вопр. онкологии*. 1981. Т. 27. № 10. С. 56–62.
2. Вальтер А.И., Касаткина О.А., Петренко А.Е. К методике анализа нитрозаминов в пищевых продуктах // *Гигиена и санитария*. 1996. № 6. С. 49–50.
3. Воронин В.М., Литвинов Н.Н., Казачков В.И., Шамарин А.А., Журков В.С. Изучение зависимости канцерогенного эффекта от концентрации от концентрации N-нитрозодиэтиламин // *Вопр. онкологии*. 1989. Т. 35. № 6. С. 685–689.
4. Гершензон В.Е., Смирнова Е.В., Элиас В.В. Информационные технологии в управлении качеством среды обитания. М.: Academia, 2009. 288 с.
5. Гичев Ю.П. Загрязнение окружающей среды и здоровье человека. М.; Новосибирск: Центр экол. политики России, 2003. 230 с.
6. Давыдов О.Н., Исаева Н.М., Куровская Л.Я., Базеев Р.Е. Роль токсического загрязнения в опухолеобразовании у рыб // *Гидробиол. журн.* 2001. Т. 37. № 5. С. 81–97.
7. Дмитриенко Н.П., Кишко О., Шандаренко С.Г. О роли квантиноксидазы в цитотоксическом действии нитратов и нитритов // *Укр. биохим. журн.* 2001. Т. 73. № 6. С. 113–117.
8. Зульфигаров О.С., Юрченко В.В. Канцерогенные N-нитроамины, токсические свойства, образование, определение // *Современные проблемы токсикологии*. 2005. № 1. С. 53–57.
9. Ильницкий А.П., Юрченко В.А., Жукова Г.Ф., Ермилов В.Б. Оценка степени канцерогенной опасности малых доз нитритов // *Вопр. онкологии*. 1989. Т. 36. № 7. С. 843–847.
10. Клоченко П.Д., Михайленко В.М., Шевченко Т.Ф. Влияние N-нитроаминов на развитие фитопланктона // *Гидробиол. журн.* 2001. Т. 37. № 4. С. 30–38.
11. Клоченко П.Д., Сакевич А.И., Усенко О.М., Шевченко Т.Ф. Изменение структуры фитопланктона под воздействием мочевины // *Гидробиол. журн.* 2000. Т. 36. № 6. С. 62–74.
12. Моисеенко Т.И. Эволюция биогеохимических циклов в современных условиях антропогенных нагрузок: пределы воздействия // *Геохимия*. 2017. № 10. С. 1–22.
13. Моисеенко Т.И., Руднева И.И. Глобальное загрязнение и функции азота в гидросфере // *ДАН*. 2008. Т. 420. № 3. С. 395–400.
14. Нитраты, нитриты и N-нитрозосоединения. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Женева: ВОЗ, 1981. 118 с.
15. Омельченко С.О. Содержание нитроаминов в некоторых массовых видах черноморских рыб // *Агрэкол журн.* 2004. № 3. С. 71–73.
16. Омельченко С.О. Сезонная динамика содержания нитроаминов у некоторых видов черноморских рыб // *Агрэкол. журн.* 2006. № 1. С. 72–75.
17. Омельченко С.О. Состояние азотистого обмена рыб в условиях загрязнения нитроаминами и токсичными элементами. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Одесса: Одесский нац. ун-т, 2009. 25 с.
18. Омельченко С.О. Экотоксикологическая оценка некоторых видов черноморских рыб. // *Уч. зап. Таврического нац. ун-та. Сер. биология, химия*. 2012. Т. 25. № 4. С. 144–149.
19. Омельченко С.О., Залевская И.Н. Влияние микробного загрязнения и содержания нитроаминов на изменение азотистого обмена в тканях черноморских рыб // *Уч. зап. Крымского федерального ун-та. Сер. биология и химия*. 2015. Т. 1. № 3. С. 39–48.
20. Омельченко С.О., Залевская И.Н., Мащева О.Л., Руднева И.И. Сезонные особенности азотистого обмена и содержания нитроаминов у морского ерша // *Экосистемы Крыма, их оптимизация и охрана*. 2006. № 16. С. 78–82.
21. Омельченко С.О., Чеснокова И.И., Залевская И.Н. Особенности азотистого обмена и содержания нитроаминов в тканях черноморских рыб, относящихся к разным экологическим группам // *Уч. зап. Крымского федерального ун-та. Сер. биология и химия*. 2016. Т. 2. № 2. С. 47–57.
22. Рубенчик Б.Л. Образование канцерогенов из соединений азота. Киев: Наук. думка, 1990. 220 с.
23. Руднева И.И., Мельникова Е.Б., Кузьминова Н.С., Омельченко С.О., Залевская И.Н., Симчук Г.В. Влияние экологических факторов на уровень нитроаминов у морских рыб // *Экол. химия*. 2007. Т. 16. № 3. С. 166–175.
24. Руднева И.И., Мельникова Е.Б., Кузьминова Н.С., Омельченко С.О., Залевская И.Н., Симчук Г.В. Оценка влияния минеральных соединений азота на донных рыб в бухтах Черного моря // *Вод. ресурсы*. 2008. Т. 35. № 4. С. 260–267.
25. Руднева И.И., Мельникова Е.Б., Омельченко С.О. Содержание нитроаминов в массовых видах рыб Черного моря // *Рыбное хоз-во Украины*. 2006. № 5–6. С. 47–49.
26. Тутельян В.А., Лулева Н.В. О механизме острого токсического действия N-нитрозодиметиламина // *Фармакология и токсикология*. 1983. № 9. С. 111–114.
27. Худoley В.В. Роль возраста в канцерогенезе, индуцированном N-нитрозодиметиламином и N-диметилнитраминоном у амфибий // *Вопр. онкологии*. 1981. Т. 27. № 10. С. 67–71.
28. Худoley В.В., Малавей В.К., Барч Х. Изучение мутагенных свойств канцерогенных N-нитроаминов *in vivo* и *in vitro*. *Вопр. онкологии*. 1981. Т. 27. № 7. С. 843–847.
29. Экотоксикологические исследования прибрежной черноморской ихтиофауны в районе Севастополя / Под ред. И.И. Рудневой. М.: ГЕОС, 2016. 360 с.
30. Янышева Н.Я. О методологических вопросах нормирования химических канцерогенных веществ в окружающей среде // *Гигиена и санитария*. 2003. № 1. С. 54–57.

31. *Barabasz W.E., Rozycki E., Smyk B.* The occurrence of carcinogenic nitrosamines in the aquatic environment (fishponds in wetlands) // *Acta Hydrobiol. Cracow.* 1995. V. 37. P. 23–27.
32. *Bartsch H., Camus A., Malaveille C.* Comparative mutagenicity of N-nitrosamines in a semisolid and a liquid incubation system in the presence of rat or human tissue fractions, *Mutation Research // Fundam. Mol. Mech. Mutagen.* 1976. V. 37 (2–3). P. 149–162.
33. *Bieniarz K., Epler P., Kime D., Sokolowska-Mikolajczyk M., W. Popek W., Mikolajczyk T.* Effects of N,N-dimethylnitrosamine (DMNA) on *in vitro* oocyte maturation and embryonic development of fertilized eggs of carp (*Cyprinus carpio* L.) kept in eutrophied ponds // *J. Appl. Toxicol.* 1996. V. 16. P. 153–156.
34. *Gao S., Li C., Jia C., Zhang H., Guan Q., Wu X., Wang J., Lv M.* Health risk assessment of groundwater nitrate contamination: a case study of a typical karst hydrogeological unit in East China // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. V. 27. 9274–9287.
35. *Goodall M., Kennedy T.* Carcinogenicity of dimethylnitramine in the NZR rats and, NZO mice // *Cancer Lett.* 1976. V. 1. P. 295–298.
36. *Haman K.H., Norton T.M., Thomas A.C., Dove A.D.M., Tseng F.* Baseline health parameters and species comparisons among free-ranging Atlantic sharpnose (*Rhizoprionodon terraenovae*), bonnethead (*Sphyrna tiburo*) and spiny dogfish (*Squalus acanthias*) sharks in Georgia, Florida, and Washington, USA // *J. Wildlife Diseases.* 2012. V. 48. № 2. P. 205–306.
37. *He X., Huang K.* Chapter 7. Assessment technologies for hazards/risks of wastewater // *High-Risk Pollutants in Wastewater.* Amsterdam: Elsevier Inc., 2020. P. 141–157.
38. *Huang J., Xu C.- C., Ridoutt B.G., Wang X.-C., Ren P.-A.* Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China // *J. Cleaner Prod.* 2017. V. 159. P. 171–179.
39. *Jensen F.B.* Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals // *Comp. Biochem. Physiol. Pt A. Mol. Integr. Physiol.* 2003. V. 135. № 1. P. 9–24.
40. *Kartal B.K., J.G. Kuenen, M.C.M.V. Loosdrecht,* Sewage treatment with anammox // *Sci.* 2010. V. 328. P. 702–703.
41. *Naing N.N., Sze Chieh Tan S.Ch., Lee H.K.* 16 – Microsolid-phase extraction // *Handbooks in Separation Science.* Amsterdam: Elsevier Inc., 2020. P. 443–471.
42. *Priya E.R., Ravichandran S., Gobinatha Th., Tilvib S., Devib P.S.* Functional characterization of anti-cancer sphingolipids from the marine crab *Dromia dehanni* // *Chem. Phys. Lipids.* 2019. V. 221. P. 73–82.
43. *Rudneva I.I., Kuzminova N.S., Omelchenko S.O.* Trace elements and nitrosamines concentration in Black Sea elasmobranch species // *Asian J. Biol. Life Sci.* 2012. V. 1. № 1. P. 51–57.
44. *Rudneva I.I., Melnikova E.B., Omelchenko S.O.* Seasonal variations of nitrosamine content in some Black Sea fish species // *Turk. J. of Fish. Aquat. Sci.* 2008. V. 8. № 2. P. 283–287.
45. *Sang N.J., Lee S.J., Shin J.H., Kim J.G.* The formation of N-nitrosamine in Alaska Pollack during its drying // *J. Korean Fish. Soc.* 1997. V. 30. № 5. P. 753–758.
46. *Sole M., Rodriguez S., Papiol V., Maynou F., Cartes J.E.* Xenobiotic metabolism markers in marine fish with different trophic strategies and their relationship to ecological variables // *Comp. Biochem. Physiol.* 2009. V. 149. P. 83–89.
47. *Yurchenko V.V., Molder U.* Volatile N-nitrosamines in various fish products. // *Food Chem.* 2006. V. 96. P. 325–333.
48. *Zou X.N.* Volatile N-nitrosamines and their precursors in Chinese salted fish – a possible etiological factor for NPC in China // *Int. J. Cancer.* 1994. V. 59. № 2. P. 155–158.

## ВЛИЯНИЕ ТАЙФУНА “ГОНИ” НА ПРОДУКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ЗАЛИВА ПОСЬЕТА ЯПОНСКОГО МОРЯ<sup>1</sup>

© 2021 г. С. П. Захарков<sup>а</sup> \*, Т. Н. Гордейчук<sup>а</sup>, Ю. В. Шамбарова<sup>а</sup>, Е. А. Штрайхерт<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,  
Владивосток, 690041 Россия

\*e-mail: zakharkov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 09.06.2020 г.

Рассмотрены последствия, вызванные прохождением тайфуна “Гони” в прибрежных водах зал. Посьета Японского моря. С помощью профилографа SBE-19plus в ходе береговых экспедиций измерялись гидрологические характеристики: температура, солёность и гидробиологические показатели флуоресценции хлорофилла *a* и окрашенного растворённого органического вещества спустя неделю после прохождения тайфуна. Для выявления влияния тайфуна на экосистему данные, измеренные после прохождения тайфуна, сравнивались с соответствующими показателями, полученными в близких координатах в один и тот же сезон годом ранее, без тайфуна. Выявлена высокая связь между концентрацией хлорофилла *a* и поступлением пресных вод с континента. Показано, что окрашенное растворённое органическое вещество определяется, наряду с континентальным выносом, автотонными процессами. Для решения поставленной в работе задачи привлекались спутниковые данные, которые позволили наблюдать изменения экосистемы на больших акваториях и установить, что произошедшие в результате воздействия тайфуна изменения приближают прибрежную зону к состоянию эстуариев рек.

**Ключевые слова:** тайфун, гидрологические и гидробиологические характеристики, дистанционные исследования, эстуарии рек.

**DOI:** 10.31857/S0321059621020176

Приморский край относится к регионам, наиболее подверженным тайфунам. Время их выхода в умеренные широты Дальнего Востока наблюдается с июля по сентябрь. Тайфун “Гони” (с корейского “Лебедь”) накрыл Приморье 27 августа 2015 г. и принес рекордное количество осадков. Аналогичные по силе тайфуны наблюдаются в Приморском крае раз в каждые 6–10 лет [2]. Усиление ветра и большое количество осадков – основные характеристики физического воздействия тайфунов. Особенно подвержены ударам стихии континентальные шельфы. Эта область морской акватории имеет малую глубину, и физические нарушения могут изменять гидрологические и через них – гидробиологические параметры, один из которых – фитопланктон [22–24, 27, 34, 35]. Эти изменения могут сохраняться от нескольких недель до месяца [12, 17, 18, 20, 21, 28, 36].

В качестве показателя физиологического состояния фитопланктона наиболее часто используется пигмент микроводорослей хлорофилл *a*. Содержание пигмента в морском фитопланктоне служит важной характеристикой оценки первичной биопродуктивности вод и позволяет выявить короткопериодные изменения, происходящие в экосистемах под воздействием различных природных процессов. Есть закономерная связь между его количеством и величиной продукции фитопланктона [9, 10].

Прохождение тайфунов способствует увеличению концентрации хлорофилла *a* (КХЛ) и, соответственно, повышению биопродуктивности вод [22, 23, 26, 35]. Известно, что интенсивность фотосинтеза связана с рядом условий, основные из которых – освещённость и концентрация биогенных элементов. Ветры, сопровождающие стихию, способствуют увеличению поступления питательных элементов в зону фотосинтеза. Богатые биогенами глубинные воды поступают в поверхностные слои, в результате чего происхо-

<sup>1</sup> Финансирование работы проведено в рамках Федерального Государственного проекта АААА-А17-117030110033-0.

дит уменьшение температуры поверхности моря и образование первичной продукции (ПП). При этом сообщается, что именно сила ветра тайфуна и время его прохождения индуцируют цветение фитопланктона [28]. Усиленный материковый сток после обильных осадков обуславливает дополнительное поступление биогенов в прибрежные воды, приводящее к значительному увеличению концентрации фитопланктона [20, 24, 25]. Наряду с биогенами в прибрежные воды поступает растворенное органическое вещество (РОВ) – неотъемлемое содержимое вод, которое бывает аллохтонного и автохтонного происхождения.

Несмотря на большой научный интерес к последствиям тайфунов, влияние их на фитопланктон и присутствующее во всех типах природной воды РОВ изучено недостаточно. При этом фитопланктон, первичный источник энергии в пищевых цепях наряду с РОВ, – один из самых важных климатообразующих факторов. Обильное развитие фитопланктона в водоемах напрямую связано со снижением углекислого газа в атмосфере планеты, от количества которого зависит “парниковый эффект”. Участие микроводорослей в процессе поглощения углерода подтверждено в работе [29]. РОВ природного происхождения – также один из наиболее важных компонентов пресноводных и морских экосистем, ключевой фактор кругооборота углерода и изменения климата на нашей планете [3].

Работа посвящена изучению влияния прохождения тайфуна “Гони” на продуктивность прибрежных вод зал. Посыета Японского моря. При изучении пространственно-временной изменчивости фитопланктона и органического вещества наряду с традиционными методами исследования использованы новые подходы, обеспеченные космическими оптическими датчиками.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены в ходе прибрежных экспедиций на стандартном разрезе на суточных станциях (рис. 1) 06.09.2014–07.09.2014 г. (год без тайфуна) и 05.09.2015–06.09.2015 г. (спустя неделю после прохождения тайфуна “Гони”). Координаты станций разреза были одними и теми же в разные годы:  $42^{\circ}28'–42^{\circ}34'$  с.ш. и  $131^{\circ}7'$  в.д.; якорной станции в 2014 г. –  $42^{\circ}34.8'$  с.ш. и  $131^{\circ}36.3'$  в.д.; якорной станции в 2015 г. –  $42^{\circ}34.5'$  с.ш. и  $131^{\circ}36.8'$  в.д. Для исследований использовалось малое научно-исследовательское судно (НИС) “Малахит”. Интенсивность флуоресценции хлорофилла *a* (ФХЛ) окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), температуру *T*, соленость *S* и интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) измеряли профилографом SBE-19plus, установленным на судне. Гидрологический разрез включал 7 точек (станции 1–7) на трассе: п-ов Га-

мова – шельфовый склон Японского моря. Зондирование на разрезе проводили с интервалом между станциями в 1 милю, на якорной станции – каждый час в течение суток. Измерения проводили по прямому и обратному ходу судна. В расчетах использовали данные прямого хода, за исключением расчетов в целях сравнения параметра *S*, приведенного в табл. 1. Ошибки измерений профилографа по *T* –  $\leq 0.01^{\circ}\text{C}$ , по *S* воды –  $0.02\%$ . Для измерения ФХЛ использовали прокачиваемый флуоресцентный датчик с чувствительностью от 0.03 мкг/л, диапазоном измерений 0.03–75.00 мкг/л (“WetLabs”); ОРОВ – прокачиваемый флуоресцентный датчик с чувствительностью от  $10^{-7}$  г/кг, диапазоном измерений 0– $10^{-3}$  г/кг, длиной волны возбуждения флуоресценции 370 нм, длиной волны регистрации флуоресценции 460 нм (“WetLabs”). Концентрацию ОРОВ определяли по его флуоресценции, используя заводские калибровки (по сульфату хинина). Установлена очень высокая связь между показаниями ФХЛ ОРОВ и общей концентрацией растворенного органического углерода для прибора “SBE-19plus”. Коэффициент детерминации равнялся 0.96 для разных лет [14]. Параллельно с измерением ФХЛ фитопланктона измеряли КХЛ. Данные о КХЛ использовали для калибровки зонда при измерении ФХЛ. Отбор проб воды для анализа на содержание КХЛ проводили с НИС батометрами Нискина объемом 5 л с различных горизонтов, кратных величинам прозрачности воды по диску Секки (0.5, 1.5, 3). На суточных станциях пробы отбирались, как правило, с глубины 1.5–2.0 м. Отобранные пробы объемом 1.0–1.5 л фильтровали через мембранные фильтры “Vladipog” диаметром 35 мм с размером пор 0.6 мкм. Фильтрацию осуществляли под разрежением  $\leq 1.5$  м водяного столба. Образцы замораживали и хранили при температуре  $-18^{\circ}\text{C}$ . В лаборатории на берегу их впоследствии экстрагировали в 90%-м растворе ацетона и измеряли на спектрофотометре [4]. Использовали статистические методы обработки материала [5], где для 71 пары измерений (в данном случае) при уровне значимости 0.001 все значения коэффициента корреляции выше критического уровня 0.3799 – значимые. Уровень ПП фитопланктона, необходимый при расчете ассимиляционного числа, определяли радиоуглеродным методом по методике, описанной авторами статьи ранее [6, 7]. ФАР, используемый в расчетах ПП, определяли долей (%) от поверхностной величины, определенной на глубине 0.5 м (табл. 2).

Для изучения влияния тайфуна “Гони” (2015 г.) на продукционные характеристики зал. Посыета полученные данные сравнивались с данными измерений, проведенных в тот же временной период (осенью) в 2014 г. на разрезе и суточных станциях, находящихся в близких координатах. Для получения параметров КХЛ, показателя поглощения света детритом и желтым веществом *adg*,

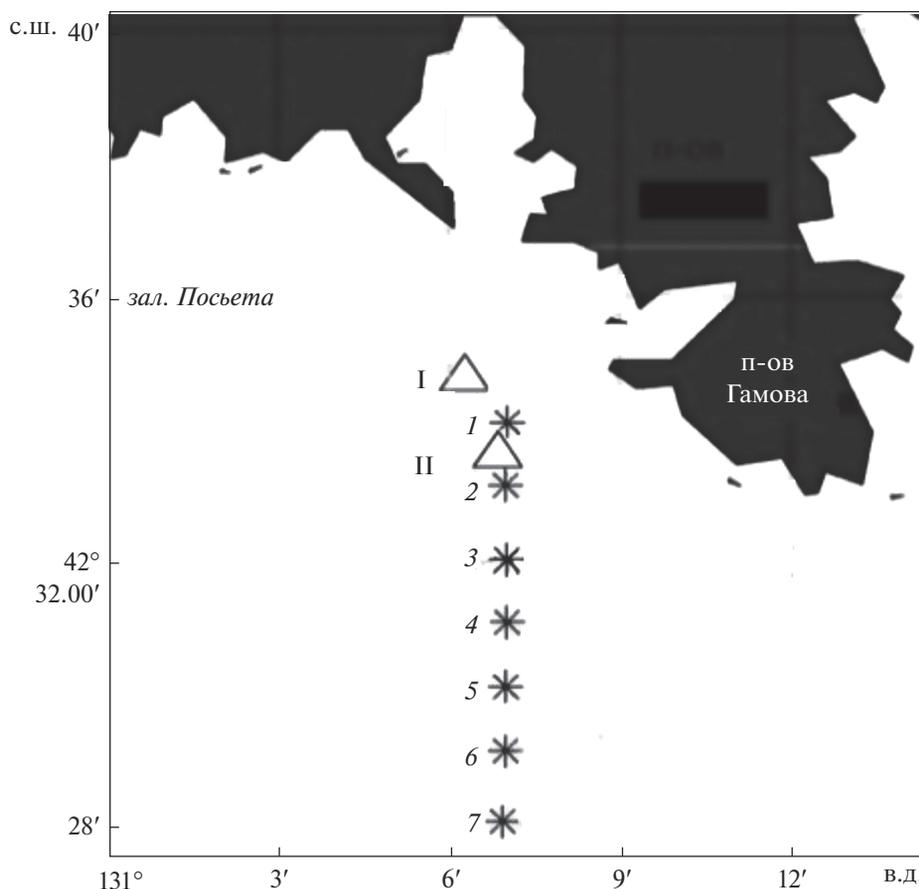


Рис. 1. Картограмма территории расположения суточных станций ( $\Delta$ ) и станций разреза (\*).

изучения их пространственных распределений использовались спутниковые данные уровня 2 MODIS-Aqua для безоблачных ситуаций. Они получены авторами при обработке данных уровня 1. Данные уровня 1 получены в международном центре космических полетов им. Годдарда [30, 31]. Обработка данных выполнялась с использованием программного обеспечения SeaDAS версий 6.4 и 7.3. При генерации данных уровня 2 использовалась рекомендуемая для мутных прибрежных вод атмосферная коррекция MUMM (Management Unit of the North Sea Mathematical Models) [33]. Ее выполнение для шельфовых вод зал. Петра Великого проверено в работах [1, 19]. Параметр КХЛ при генерации данных уровня 2 для MODIS-Aqua рассчитывался по стандартной комбинации алгоритмов: ОСЗМ для КХЛ  $> 0.2 \text{ мг/м}^3$  [32] и разработанного для КХЛ  $< 0.15 \text{ мг/м}^3$  [26].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показано сравнение изучаемых параметров на станциях разреза в 2014 и 2015 гг. Более высокая  $T$  отмечалась на поверхности и в столбе воды в 2015 г. При этом в 2015 г. наблюдалось

уменьшение температурного диапазона между поверхностными и придонными водами на мелководных станциях приблизительно в два раза по сравнению с 2014 г. (разница  $T$  составила  $\sim 5^\circ\text{C}$  против  $10^\circ\text{C}$ ). Та же тенденция в разнице  $T$  сохранялась и для глубоководных станций разреза до глубины 50 м.

После прохождения тайфуна в поверхностных слоях вод на станциях разреза происходило распреснение. Наибольшее его проявление наблюдалось на станциях, расположенных ближе к берегу;  $S$  на поверхности станций 1–3 равнялась соответственно 27.31, 28.15, 27.95‰, тогда как в 2014 г.  $S$  на этих станциях – 33.0‰. При удалении станций разреза от берега в 2015 г.  $S$  в поверхностных горизонтах возрастала, достигая максимума (30.92‰) на последней мористой станции. С глубиной происходило монотонное уменьшение разницы средних значений  $S$  до глубины 30 м, где среднее значение  $S$  достигало 33.25‰. В отличие от съемки в 2014 г., где преимущественно наблюдалось по одному максимуму ФХЛ на глубине, в 2015 г. после прохождения тайфуна два выраженных максимума ФХЛ наблюдались на всех семи станциях разреза в приповерхностных (3–10 м) и

**Таблица 1.** Изменение  $S$ , ‰, на станциях разреза 2015 г. при прямом и обратном прохождении судна, ( $H$  – глубина измерения, м)

$H$ , м	№ станций, время съемки, ч:мин												
	1 15:11	2 15:28	3 15:56	4 16:26	5 16:53	6 17:13	7 17:39	6 18:36	5 18:54	4 19:14	3 19:38	2 19:58	1 20:18
1	27.33	28.16	27.96	29.99	30.50	30.37	30.92	31.80	31.98	32.30	29.45	28.14	28.53
5	30.92	30.93	30.89	32.02	32.09	31.70	31.67	31.83	31.99	32.31	32.04	31.69	31.17
10	32.40	32.24	32.57	32.55	32.45	32.52	32.47	32.32	32.51	32.39	32.25	32.26	32.10
15	32.85	32.63	32.65	32.64	32.70	32.62	32.76	32.68	32.68	32.60	32.61	32.63	32.77
20	33.13	32.97	32.72	32.73	32.80	32.71	32.87	32.77	32.91	32.98	32.83	33.07	32.97
25	33.29	33.21	33.02	32.97	32.92	32.85	32.89	32.92	33.11	33.30	33.12	33.22	33.19
30	33.57	33.56	33.23	33.21	33.08	33.06	32.99	33.09	33.26	33.55	33.45	33.51	33.31
35	33.48	33.50	33.52	33.29	33.17	33.26	33.14	33.19	33.54	33.50	33.51	33.53	33.59
40	33.48	33.48	33.53	33.58	33.29	33.39	33.26	33.43	33.56	33.59	33.50	33.47	
45			33.52	33.47	33.40	33.57	33.28	33.56	33.39	33.46			
50				33.38	33.43	33.46	33.41	33.44	33.45				
55				33.50	33.51	33.47	33.52	33.50	33.55				
60					33.82	33.80	33.68	33.75					
65					33.96		33.85	33.98					
70							33.94						

заглубленных (25–30 м) горизонтах. На первых двух прибрежных станциях приповерхностные максимумы ФХЛ превышали значения заглубленных максимумов. На остальных станциях они были ниже заглубленных. На разрезе 2015 г., в отличие от съемки 2014 г., максимум значений ОРОВ был на поверхности, флуоресценция ОРОВ составила 13.56 мг/м<sup>3</sup>, снижаясь с глубиной. В 2014 г. максимумы фиксировались в придонных горизонтах на глубине ≤40 м. Концентрации ОРОВ выравнивались между двумя сравниваемыми станциями на глубине 26 м.

Для изучения кратковременной изменчивости гидробиологических характеристик применен обратный ход судна и выполнен повторный разрез от ст. 7 к ст. 1 (табл. 1). Из повторной съемки видно, что симметрично расположенные станции не повторяют профиль даже такого консервативного параметра, как  $S$ , что, вероятно, проявляет гидродинамические процессы, в том числе и внутреннего прилива [11].

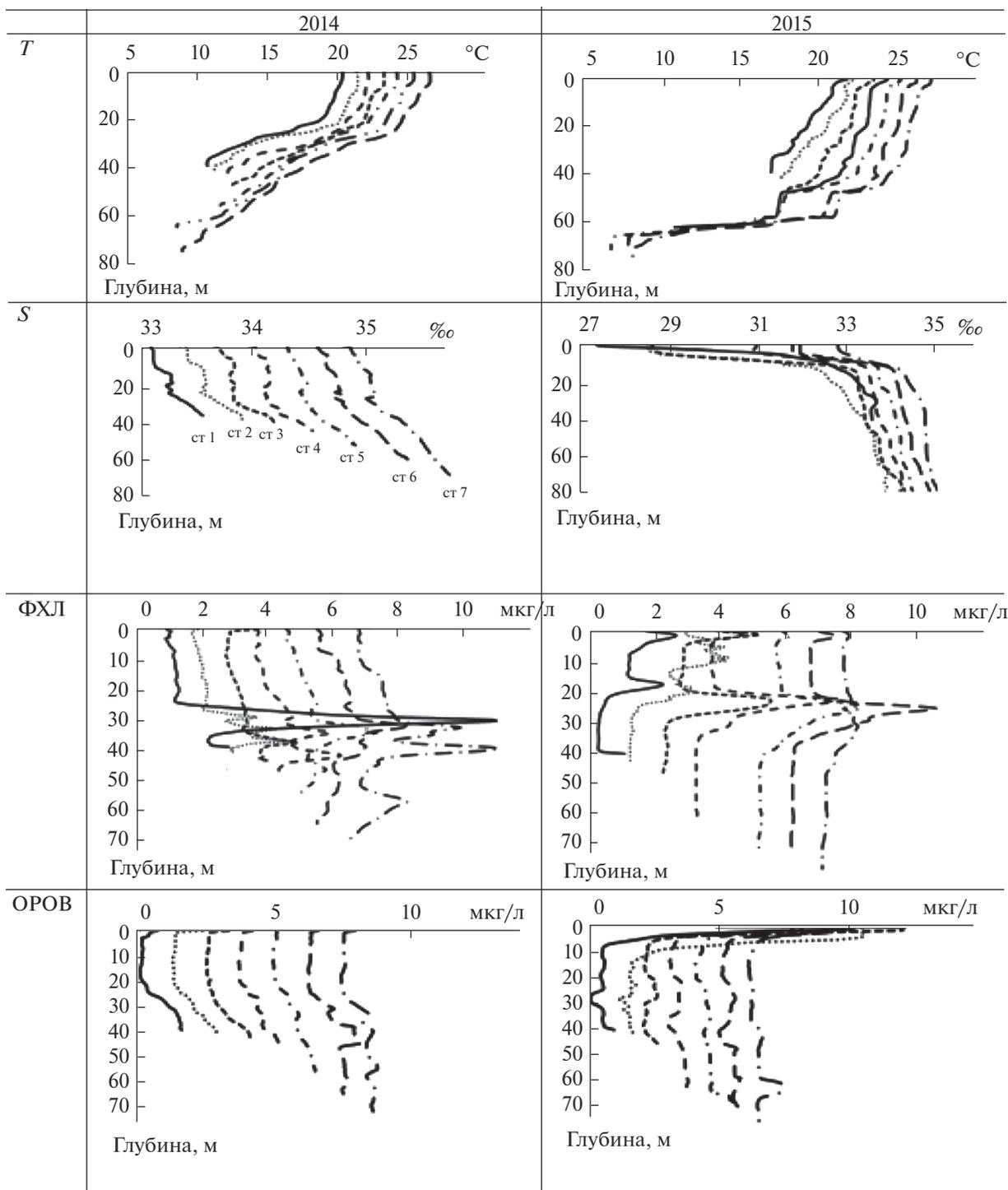
Для лучшего понимания связи гидрологических и гидробиологических процессов и сглажи-

вания внутрисуточной изменчивости выполнены суточные станции. На рис. 3 представлено сравнение изучаемых параметров. При сравнении параметров станций 2014 и 2015 гг. выявлено следующее: среднесуточное значение  $T$  на поверхности суточных станций в оба года различалось на 1.4°C. При этом с глубиной значения  $T$  различались более существенно: на глубине 35.5 м в 2015 г.  $T$  была выше на 5.5°C, чем придонная  $T$  в 2014 г. (рис. 3а).

Как и на станциях разреза, на поверхностных горизонтах суточной станции в 2015 г. наблюдалось распреснение: по сравнению с 2014 г. среднесуточная  $S$  уменьшилась на 5.5‰ (рис. 3б). С глубиной происходило уменьшение разницы значений  $S$ , на глубине 11.5 м она составляла 1‰, на глубине 35.5 м, где показатели  $T$  отличались на 5.5°C, разница между показателями  $S$  составляла 0.2‰. В столбе воды на станции, подвергшейся воздействию тайфуна (2015 г.), наблюдалось два максимума ФХЛ. Первый максимум ФХЛ отмечен в поверхностных водах, концентрация пигмента составила 5.06 мкг/л. Второй максимум об-

Таблица 2. Изменчивость концентрации ОРОВ с глубиной в зависимости от ПП фитопланктона

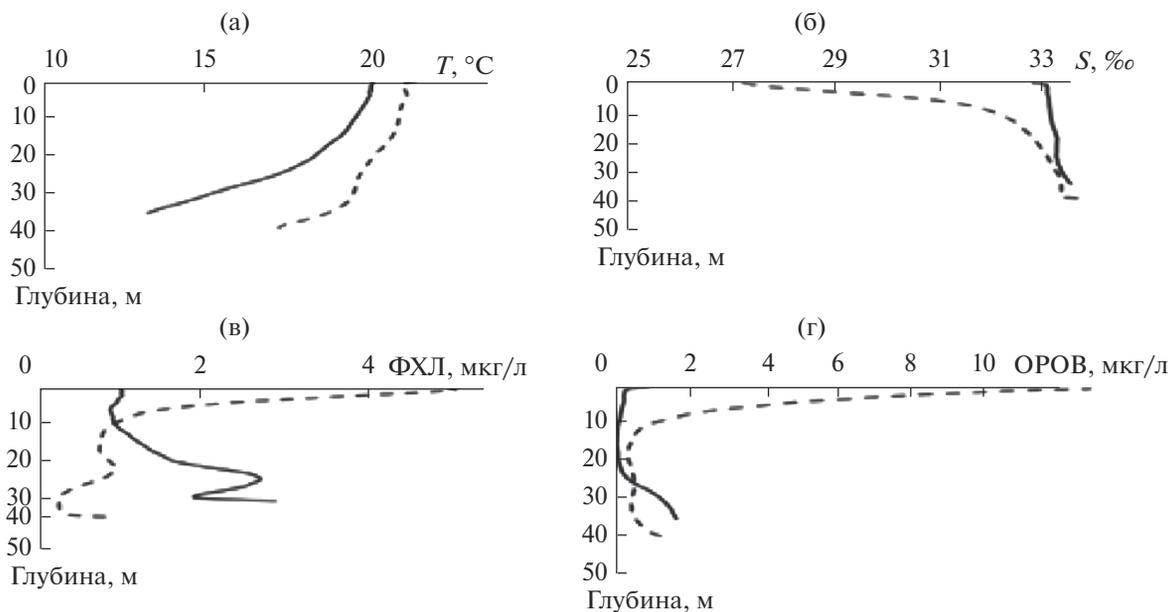
Глубина, м	ФАР, % от поверхности	ФХЛ, мкг/л	Относительная величина ПП	S 2015 г., ‰	S 2014 г., ‰	Пресная вода, л	ОРОВ 2015 г., мкг/л	ОРОВ 2014 г., мкг/л	Разница ОРОВ 2014–2015 гг.	ОРОВ/л пресной воды × 100 мкг/л
0.5	100	5.06	5.06	27.24	33.03	177.89	13.56	1.02	12.54	7.05
1	84.16	5.15	5.15	27.25	33.05	178.0	13.09	0.52	12.57	7.06
1.5	61.08	4.91	4.91	27.45	33.05	171.87	11.12	0.39	10.73	6.24
2	48.73	4.62	4.62	27.66	33.06	165.78	9.90	0.38	9.52	5.74
2.5	39.44	4.23	4.23	27.91	33.05	157.86	8.66	0.36	8.30	5.25
3	31.90	3.83	3.83	28.24	33.06	147.71	7.65	0.35	7.30	4.94
3.5	26.17	3.45	3.45	28.62	33.06	136.39	6.79	0.36	6.43	4.71
4	21.7	3.08	3.08	28.98	33.06	125.46	5.94	0.36	5.58	4.44
4.5	18.20	2.72	2.72	29.33	33.07	114.74	5.17	0.35	4.82	4.20
5	15.47	2.41	2.41	29.72	33.08	103.26	4.55	0.34	4.21	4.08
5.5	13.32	2.15	2.15	30.10	33.08	91.49	4.00	0.32	3.68	4.02
6	11.73	1.93	1.93	30.43	33.09	81.50	3.51	0.31	3.20	3.93
6.5	10.52	1.75	1.75	30.71	33.09	73.15	2.99	0.29	2.70	3.69
7	9.54	1.59	1.59	30.94	33.09	66.13	2.56	0.28	2.28	3.45
7.5	8.71	1.45	1.45	31.14	33.09	60.10	2.21	0.27	1.94	3.21
8	8.01	1.34	1.34	31.32	33.10	54.53	1.93	0.27	1.66	3.04
8.5	7.41	1.26	1.26	31.48	33.10	49.74	1.69	0.25	1.44	2.89
9	6.89	1.20	1.20	31.62	33.11	45.64	1.49	0.24	1.25	2.74
9.5	6.43	1.15	1.15	31.74	33.11	42.14	1.29	0.23	1.06	2.52
10	6.00	1.09	1.09	31.84	33.11	39.00	1.09	0.21	0.88	2.25
10.5	5.63	1.04	1.04	31.94	33.11	36.06	0.96	0.20	0.76	2.10
11	5.28	1.00	1.00	32.02	33.12	33.57	0.85	0.19	0.66	1.96
11.5	4.97	0.95	0.95	32.09	33.12	31.67	0.74	0.18	0.56	1.75
12	4.68	0.90	0.94	32.16	33.13	29.68	0.66	0.18	0.48	1.62
12.5	4.41	0.88	0.89	32.23	33.13	27.69	0.61	0.18	0.43	1.55
13	4.16	0.86	0.84	32.29	33.14	25.87	0.56	0.18	0.39	1.49
13.5	3.93	0.84	0.79	32.35	33.14	24.28	0.53	0.17	0.35	1.46
14	3.72	0.82	0.75	32.40	33.15	22.90	0.50	0.17	0.33	1.44
14.5	3.53	0.81	0.71	32.45	33.16	21.73	0.48	0.17	0.31	1.43
15	3.36	0.81	0.68	32.49	33.16	20.77	0.46	0.17	0.29	1.42
15.5	3.11	0.80	0.62	32.52	33.18	20.00	0.44	0.16	0.27	1.37
16	2.95	0.79	0.59	32.55	33.19	19.45	0.41	0.16	0.25	1.29
16.5	2.82	0.78	0.57	32.59	33.20	18.87	0.39	0.17	0.23	1.21
17	2.69	0.77	0.54	32.61	33.21	18.27	0.38	0.17	0.21	1.15
17.5	2.58	0.77	0.52	32.64	33.22	17.62	0.38	0.19	0.19	1.08
18	2.46	0.77	0.50	32.67	33.23	17.07	0.37	0.19	0.18	1.03
18.5	2.35	0.77	0.47	32.70	33.23	16.49	0.36	0.20	0.17	1.03
19	2.25	0.77	0.45	32.73	33.24	15.82	0.36	0.19	0.17	1.06
19.5	2.16	0.77	0.43	32.76	33.25	15.05	0.37	0.20	0.17	1.13
20	2.07	0.77	0.42	32.78	33.25	14.20	0.38	0.20	0.18	1.27
20.5	1.87	0.78	0.38	32.81	33.24	13.25	0.40	0.21	0.19	1.37
21	1.76	0.80	0.35	32.83	33.24	12.47	0.42	0.23	0.19	1.52
21.5	1.69	0.83	0.34	32.86	33.24	11.79	0.44	0.25	0.19	1.62
22	1.59	0.85	0.32	32.88	33.24	11.15	0.45	0.26	0.19	1.70
22.5	1.51	0.87	0.30	32.89	33.24	10.61	0.47	0.28	0.19	1.76
23	1.45	0.88	0.29	32.91	33.24	10.00	0.48	0.30	0.18	1.78
23.5	1.36	0.90	0.27	32.93	33.24	9.37	0.49	0.33	0.16	1.70
24	1.28	0.93	0.26	32.95	33.24	8.67	0.50	0.37	0.13	1.51
24.5	1.23	0.95	0.25	32.98	33.23	7.86	0.52	0.42	0.10	1.29



**Рис. 2.** Пространственное распределение основных гидрологических и гидробиологических параметров на станциях гидрологического разреза в 2014 и 2015 гг. *T*, °C – температура для разделения профилей станций к значению каждой последующей прибавляется 1°C; *S*, ‰ – соленость, к значению каждой последующей станции прибавляется по 0.3‰; ФХЛ, мкг/л – к значению каждой последующей станции прибавляется по 1 мкг/л; ОРОВ, мкг/л – к значению каждой последующей станции прибавляется 1 мкг/л.

наружен на глубине 25 м (0.97 мкг/л). В 2014 г. ФХЛ на поверхности была равна 1.03 мкг/л, а максимум был на глубине 28.5 м и составлял

2.75 мкг/л (рис. 3в). По аналогии с ФХЛ на поверхности станции после прохождения тайфуна ФХЛ ОРОВ была увеличена в 13 раз по сравнению



**Рис. 3.** Сравнение профилей распределения с глубиной среднесуточных значений на станциях, выполненных 06.09.2014–07.09.2014 (сплошная линия) и 05.09.2015–06.09.2015 (прерывистая линия). а – температура  $T$ ; б – соленость  $S$ ; в – ФХЛ; г – флуоресценция ОРОВ.

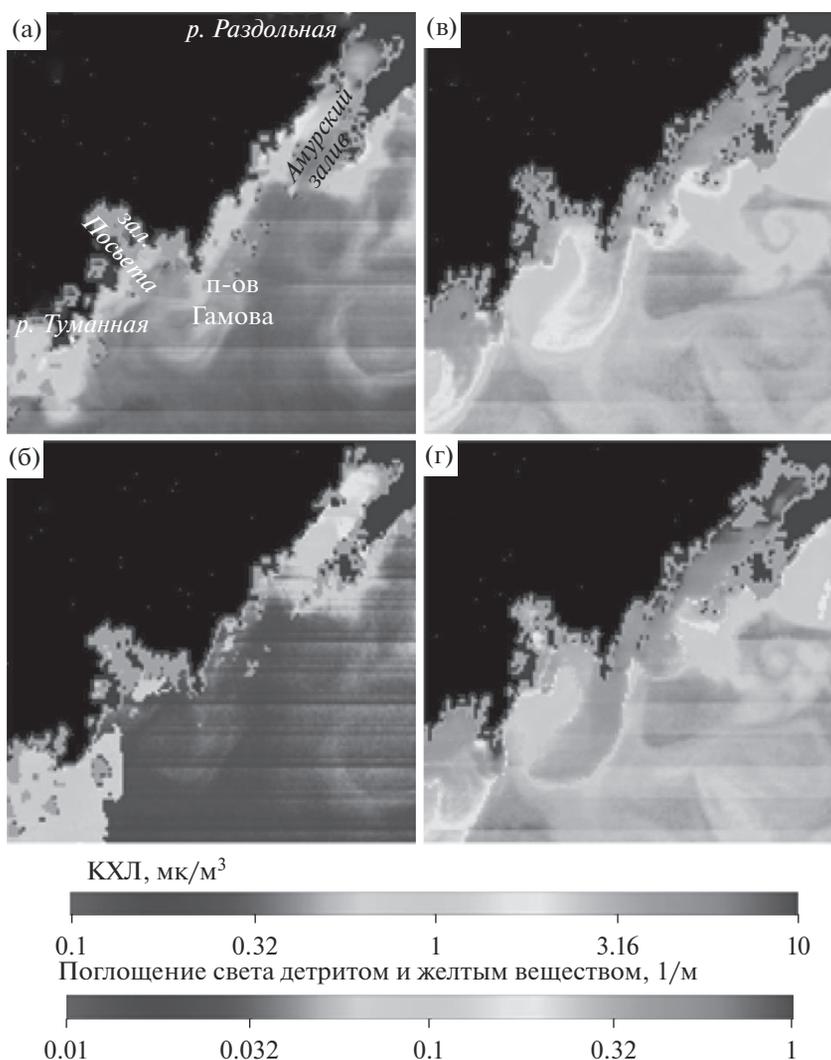
с 2014 г. (рис. 3г). На глубине 26–26.5 м концентрации ОРОВ в разные годы становились близкими.

Для оценки влияния материкового стока на концентрацию фитопланктона, величину ПП и концентрацию ОРОВ подсчитано поступление пресной воды в различных горизонтах суточной станции 2015 г. Объем поступивших в море пресных вод в пересчете на  $1 \text{ м}^3$  прибрежных морских вод легко вычислить: разница солености ( $\%$ ) между двумя сравниваемыми годами, умноженная на 30.686 л (выведено эмпирически из расчета  $S$  прибрежной морской воды – 33‰, дождевой воды – 0‰). Подсчитано количество ОРОВ, поступившее в 1 л пресной воды (табл. 2). Для этого разницы значений этого параметра в 2014 и 2015 гг. разделили на количество поступившей воды. Обнаружено, что в перемешанном слое морской воды концентрация ОРОВ на единицу объема поступившей пресной воды снижается с глубиной и достигает минимальных значений на глубине 18 м (табл. 2; рис. 3г). При этом в придонных водах флуоресценция ОРОВ возрастает, что, очевидно, связано с деградацией отмерших осевших гидробионтов. Поэтому для изучения влияния ПП на концентрацию ОРОВ рассмотрен диапазон глубин, где не проявляется влияние придонного ОРОВ. Для изучения феномена увеличения концентрации ОРОВ от глубинных горизонтов к поверхности проведена оценка изменения величины ПП. Относительная величина ПП рассчитывалась умножением величины ФХЛ на ФАР, измеренную в 2015 г. в интервале от поверхности до глубины эвфотической зоны, где она равна 1%

поверхностной ФАР [6, 8]. Считалось, что в этом слое при ФАР  $> 5\%$  поверхностной ФАР (интенсивность света, при которой фотосинтез насыщается) ПП прямо пропорциональна КХЛ [37]. При  $1\% < \text{ФАР} < 5\%$  (1% поверхностной освещенности – точка компенсации, когда фотосинтез компенсирует дыхание водорослей [15]) ПП пропорциональна не только КХЛ, но и величине ФАР в указанном интервале. При сравнении относительной ПП и разницы ОРОВ в годы с тайфуном и без него (фактический прирост ОРОВ после тайфуна) была обнаружена высокая корреляция между ПП и приростом ОРОВ в эвфотической зоне (0.971). Показатель, характеризующий связь общего содержания хлорофилла  $a$  с интенсивностью фотосинтеза – ассимиляционное число (АЧ) был равен 4 мгС/ч мгХЛ в год без тайфуна и 8 мгС/ч мгХЛ неделю спустя после прохождения “Гони”. Через месяц после воздействия тайфуна АЧ снижалось до 5 мгС/ч мгХЛ.

На рис. 4 показано распределение КХЛ и показателя поглощения света детритом и желтым веществом  $adg$  в 2014 и в 2015 гг.

Типичные значения КХЛ на разрезе, выполненном в 2014 г., варьировали в диапазоне 0.5–1.0 мкг/л. Близкие значения этих параметров отмечались на рис. 4а. Значения  $adg$  изменялись от 0.01 до  $0.05 \text{ м}^{-1}$ . Спутниковые снимки, выполненные примерно в это же время в 2015 г. после прохождения тайфуна, показывают разительные изменения КХЛ и  $adg$ . Максимальные значения КХЛ на разрезе выросли по сравнению с 2014 г. до



**Рис. 4.** Распределение КХЛ (а, в) и поглощение света детритом и желтым веществом  $adg$  (б, г) в западной части зал. Петра Великого в осенний период в 2014 г. (а, б) без прохождения тайфуна и в 2015 г. (в, г) после прохождения тайфуна “Гони.”

0.7–3.4  $mg/m^3$  (рис. 4в). Значения  $adg$  также выросли на порядок – до 0.1–0.4  $m^{-1}$ . Обращает на себя внимание тот факт, что значения КХЛ и  $adg$  после прохождения тайфуна в прибрежных водах становятся равными значениям в эстуариях рек, в частности рек Раздольной и Туманной в год без тайфуна (рис. 4). На рис. 4в отображено распределение КХЛ после тайфуна. Ясно различимы 2 “языка” выноса вод с континента, один начинается с устья р. Туманной, второй – от п-ова Гамова. Эти “языки” выноса имеют ширину до 20 миль и распространяются на расстоянии ~50 миль от берега. На границах “языков” КХЛ в 2–4 раза превышает значения в окружающих водах. Такой же контраст наблюдается и для  $adg$ . Величина  $adg$  меняется на границе “языков” выноса

у п-ова Гамова от 0.05 до 0.3  $m^{-1}$ , в устье р. Туманной – от 0.03 до 0.1  $m^{-1}$  в окружающих водах.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Действие тайфунов на шельфе сводится в основном к трем событиям: ветровому перемешиванию вод, материковому стоку и ресуспендированию осадков, что в конечном итоге приводит к повышению ПП [22, 23, 35]. Перемешивание вод под действием тайфуна при настоящих наблюдениях приводило к уменьшению разницы между поверхностной и придонной  $T$ . При этом полного смешивания вод на шельфе не происходило. Вероятно, это связано с недостаточной для этого интенсивностью ветра и со временем прохождения тайфуна. Выпадение большого количества осадков во время тайфуна сопровождалось рас-

преснением прибрежных вод; с удалением от берега  $S$  возрастала. Та же тенденция наблюдалась и с глубиной. Можно полагать, что распреснение прибрежных вод происходило в основном за счет материкового стока.

Снижение показателя  $S$  в 2015 г. хорошо коррелировало с увеличением величины ФХЛ. Численное значение коэффициента корреляции между ФХЛ и  $S$  на суточной станции было высоким и отрицательным ( $-0.973$ ). Это подтверждает вывод о том, что распресненные прибрежные воды были обогащены биогенными элементами, принесенными с суши, что способствовало росту фитопланктона и производству ПП. Среднесуточные показатели ФХЛ в поверхностных водах станции в 2015 г. увеличились в 5 раз по сравнению с этим же параметром, измеренным в 2014 г. (без тайфуна); соответственно, АЧ увеличилось в 2 раза. На разрезе наблюдалась более сложная картина: при удалении от берега значения ФХЛ уменьшались, что связано, вероятно, с приливно-отливными течениями [11]. Кроме того, что системы области шельфа очень динамичны, они также показывают большую пространственную и временную изменчивость: влияние тайфуна может различаться в зависимости от мест расположения станций [35]. Измерение  $S$  по обратному ходу судна показало, что экосистема находилась в более неустойчивом состоянии, чем в обычное время года.

Наибольших изменений по сравнению с показателями 2014 г. достигал показатель ФХЛ ОРОВ, он увеличился более чем в 10 раз. Несомненно, какая-то часть органического вещества поступила с материковыми стоками, но проведенное исследование показало, что образование большей части ОРОВ в морской воде связано с автохтонными процессами. Известно, что природный фитопланктон прижизненно экскретирует в среду РОВ до 50–80% включенного при фотосинтезе углерода, что является функцией здоровых клеток [13, 16]. При анализе последствий прохождения тайфуна над континентальным шельфом Восточно-Китайского моря также было отмечено, что скорость высвобождения РОВ из активно растущего фитопланктона возрастает [22]. Между величиной фактического прироста ОРОВ в 2015 г. (в сравнении с 2014 г.) и величиной относительной ПП выявлена высокая положительная корреляция. Это дает основание утверждать, что повышение интенсивности фотосинтетических процессов в прибрежных водах вследствие привнесения с материковыми стоками биогенов влечет за собой увеличение образования РОВ. Кроме того, в [22] показано, что сильное перемешивание толщи воды, вызванное тайфуном, может серьезно повредить клетки водорослей и другие хрупкие планктонные организмы, что также может привести к накоплению лабильного орга-

нического вещества в толще воды. Ресуспендирования осадков авторами статьи не отмечено. Небольшое возрастание концентрации ОРОВ у дна, вероятно, связано с взмучиванием их зондом.

По спутниковым данным оценено влияние тайфуна на большей акватории, чем по данным, полученным с борта судна. Судовые и спутниковые данные проведенных экспериментов показали относительное совпадение по гидробиологическим параметрам.

## ВЫВОДЫ

С привлечением различных методов исследования данная работа позволила выявить метеорологическое воздействие тайфуна силой ветра и обильными осадками на прибрежные экосистемы в зоне континентального шельфа. Хорошее перемешивание прибрежных вод привело к уменьшению градиента температуры в диапазоне глубин от 0 до 50 м. Благодаря использованию данных суточных наблюдений обнаружена высокая положительная связь между КХЛ и количеством пресных вод с континента и установлено, что образование ОРОВ определяется преимущественно автохтонными процессами. Дистанционные измерения позволили обнаружить изменения экосистемы на больших акваториях. Показано, что эти изменения в результате действия тайфуна “Гони” приближают состояние прибрежной зоны к состоянию эстуариев рек.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрин А.И., Качур В.А.* Особенности атмосферной коррекции спутниковых данных цвета океана в Дальневосточном регионе // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 56–67.
2. *Астахов А.С., Дарьин А.В., Калугин И.А., Аксентов К.И.* Реконструкция частоты катастрофических наводнений на западном побережье Японского моря по шельфовым седиментационным записям // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 91–102.
3. *Горшкова О.М., Панаева С.В., Федосеева Е.В.* Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды // Вода: химия и экология. 2009. № 11. С. 31–37.
4. ГОСТ 17.1.04.02-90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла. М.: Изд-во стандартов Госкомприроды, 1990.
5. *Джонсон Н., Лион Ф.* Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1980. 610 с.
6. *Захарков С.П., Штрайхерт Е.А., Гордейчук Т.Н., Ванин Н.С.* Первичная продукция западной части Охотского моря в весенний период // Исследования морских экосистем и биоресурсов / Отв. ред. В.П. Челомин. М.: Наука, 2007. 699 с.
7. *Захарков С.П., Владимиров А.С., Штрайхерт Е.А., Ши С., Гладких Р.В., Бузолёва Л.С.* Продукционные

- характеристики бактерий и фитопланктона в весенне-летний период в Охотском и Беринговом морях // Микробиология. 2017. Т. 86. № 3. С. 364–372.
8. *Звалинский В.И., Лобанов В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я.* Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // *Океанология*. 2006. Т. 46. № 1. С. 135–145.
  9. *Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И.* Продукция морских сообществ // Первичная продукция. Биология океана. 1977. Т. 2. Биологическая продуктивность океана. М.: Наука, С. 183–209.
  10. *Мордасова Н.В.* Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // *Тр. ВНИРО*. 2014. Т. 152. С. 41–56.
  11. *Новотрясов В.В., Захарков С.П., Степанов Д.В.* Осенний внутренний прилив в прибрежной зоне Японского моря // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 8. С. 64–69.
  12. *Пермяков М.С., Акмайкин Д.А., Салюк П.А., Бужин О.А., Тархова Т.И., Смолин П.В.* Влияние тайфунов на поля концентрации хлорофилла “а” по данным сканера цвета морской воды SeaWiFS // *Исслед. Земли из космоса*. 2005. № 5. С. 56–62.
  13. *Пропп Л.Н.* Роль витамина В<sub>12</sub> в сукцессии морских фитоценозов // *Изв. ТИНРО*. 2009. Т. 158. С. 228–246.
  14. *Пугач С.П., Пипко И.И.* Динамика растворенного окрашенного органического вещества на шельфе Восточно-Сибирского моря // *ДАН*. 2012. Т. 447. № 6. С. 671–674.
  15. *Раймонт Д.* Планктон и пищевая продуктивность океана. Т. 1. Фитопланктон. М.: Легкая и пищевая пром-ть, 1983. 568 с.
  16. *Садчиков А.П.* Экскреция органического вещества фитопланктоном в природных водоемах // *Материалы по флоре и фауне Республики Башкортостан*. Науч. журн. Вып. XIX (июнь). Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. С. 132–135.
  17. *Салюк П.А., Стёпочкин И.Е., Алексанин А.И., Голлик И.А.* Анализ воздействия тропических циклонов на поля концентрации хлорофилла-а в Северо-Западной части Тихого океана в 1979–1986 и 1996–2010 гг. с использованием данных пассивного спутникового зондирования цвета океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 2. С. 219–227.
  18. *Хаин А.П., Сутырин Г.Г.* Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 272 с.
  19. *Штрайхерт Е.А., Захарков С.П.* О пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-а на шельфе залива Петра Великого при зимне-весеннем цветении фитопланктона по спутниковым и подспутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 1–2. С. 173–186.
  20. *Шумилин Е.Н., Горячев Н.А., Касаткина А.П., Захарков С.П., Орлова Т.Ю.* Микроэлементы в sestone морской части эстуария реки Раздольной в период “красного прилива” // *Биология моря*. 1994. Т. 20. № 4. С. 286–290.
  21. *Babin S.M., Carton J.A., Dickey T.D., Wiegert J.D.* Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. C03043. <https://doi.org/10.1029/2003JC001938>
  22. *Chang J., Chung C.C., Gong G.C.* Influences of cyclones on chlorophyll-a concentration and *Synechococcus* abundance in a subtropical western Pacific coastal ecosystem // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996. V. 140. P. 199–205.
  23. *Chen C.-T. A., Liu C.-T., Chuang W.S., Yang Y.J., Shiah F.-K., Tang T.Y., Chung S.W.* Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea // *J. Marine Systems*. 2003. V. 42. P. 65–79.
  24. *Fogel M.L., Aguilar K., Cuhel R., Hollander D.J., Willey J.D., Paerl H.W.* Biological and isotopic changes in coastal waters induced by Hurricane Gordon // *Limnol. Oceanogr.* 1999. V. 44. № 6. P. 1359–1369.
  25. *Gilbes F., Armstrong R.A., Webb R.M.T., Müller-Karger F.E.* SeaWiFS helps assess hurricane impact on phytoplankton in Caribbean Sea // *EOS, Transactions, Am. Geophys. Union*. 2001. V. 82. P. 529–533.
  26. *Hu C., Lee Z., Franz B.* Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference // *J. Geophys. Res.* 2012. № 117(C1). P. 1–25. <https://doi.org/10.1029/2011jc007395>
  27. *Huang L., Zhao H., Pan J., Devlin A.* Remote sensing observations of phytoplankton increases triggered by successive typhoons // *Earth Sci.* 2017. V. 11. № 4. P. 601–608. <https://doi.org/10.1007/s11707-016-0608-x>
  28. *Lin I.I.* Typhoon-induced phytoplankton blooms and primary productivity increase in the western North Pacific subtropical ocean // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. C03039. P. 1–15. <https://doi.org/10.1029/2011JC007626>
  29. *Martin P., Lampitt R.S., Perry M.J., Sanders R., Lee C., D’Asaro E.* Export and mesopelagic particle flux during a North Atlantic spring diatom bloom // *Deep-Sea Res I*. 2011. V. 58. P. 338–349.
  30. NASA Goddard Space Flight Center. Ocean Ecology Laboratory. Ocean Biology Processing Group. MODIS Aqua Inherent Optical Properties Data. 2018 Reprocessing. Greenbelt: NASA OB. DAAC, 2018. Accessed on 08/20/2020. <https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/L2/IOP/2018>
  31. NASA Goddard Space Flight Center. Ocean Ecology Laboratory. Ocean Biology Processing Group. MODIS Aqua Ocean Color Data. 2018 Reprocessing. Greenbelt: NASA OB. DAAC, 2018. <https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018>
  32. *O’Reilly J.E., Maritoner S., O’Brien M.C. et al.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2000 год. 49 p.
  33. *Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M.* Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // *Appl. Opt.* 2000. V. 39. № 6. P. 897–912.
  34. *Salyuk P.A., Bukin O.A., Alexanin A.I. et al.* Optical properties of Peter the Great Bay waters compared with

- satellite ocean colour data // *Int. J. Remote Sensing*. 2010. V. 31. № 17, 18. P. 4651–4664.
35. *Shiah F-K., Chung S-W., Kao S-J., Gong G-C., Liu K-K.* Biological and hydrographical responses to tropical cyclones (typhoons) in the continental shelf of the Taiwan Strait // *Cont. Shelf Res.* 2000. V. 20. P. 2029–2044.
36. *Son S.H., Platt T., Bouman H., Lee D.K., Sathyendranath S.* Satellite observation of chlorophyll and nutrients increase induced by Typhoon Megi in the Japan/East Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L05607.  
<https://doi.org/10.1029/2005GL025065>
37. *Talling J.F.* Photosynthetic characteristics of some freshwater plankton diatoms in relation to underwater radiation // *New Phytol.* 1957. V. 56. P. 29–50.

УДК 551.465.7;551.515.2;551.57;556.1

## К НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ БЫСТРОДВИЖУЩИХСЯ БРЫЗГ

© 2021 г. Л. Х. Ингель<sup>a, b, \*</sup><sup>a</sup>НПО “Тайфун”, Обнинск, 249038 Россия<sup>b</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: lev.ingel@gmail.com

Поступила в редакцию 07.10.2019 г.

После доработки 25.05.2020 г.

Принята к публикации 25.09.2020 г.

Брызги, возникающие у поверхности водоемов при сильных ветрах, существенно влияют на испарение, обмен теплом и количеством движения, на перенос примесей, например солевого аэрозоля, воздействующего на облака и осадки. При этом важную роль играют высота подъема брызг и время их пребывания в воздухе. В случае быстро движущихся брызг расчет этих параметров затруднен из-за нелинейного закона сопротивления при больших скоростях. Предложен эффективный метод расчета, позволяющий получить приближенные явные зависимости упомянутых параметров от начальной скорости и размеров брызг.

**Ключевые слова:** брызги, испарение, закон движения, нелинейное сопротивление, аналитические зависимости.

DOI: 10.31857/S0321059621020073

Хорошо известна важная роль брызгообмена во взаимодействии атмосферы и больших водоемов [4, 5]. Известны различные механизмы генерации брызг у поверхности воды, которыми обусловлены широкий спектр размеров брызг, скорость и направление их движения. Один из важных механизмов образования брызг при сильных ветрах связан с разрывом пленки жидкости при всплывании пузырей воздуха. При этом могут образовываться мелкие брызги, взлетающие с очень высокой скоростью. Например, в [4] (с. 59) упоминаются начальные скорости подъема брызг – 50 и даже 100 м/с. Значения числа Рейнольдса  $Re$  в таких случаях могут достигать нескольких сотен. Этому соответствует нелинейный закон сопротивления, что затрудняет описание движения таких брызг.

Это движение в поле силы тяжести описывается уравнением

$$\frac{dw}{dt} = -g - cw, \quad (1)$$

здесь  $t$  – время;  $w$  – вертикальная скорость (вертикальная ось  $z$  направлена вверх);  $g$  – ускорение свободного падения;  $c$  – коэффициент сопротивления, вообще говоря, существенно зависящий от  $Re$ . Например, формула Клячко–Мазина:

$$c = c_s \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3}\right) \quad (2)$$

в интервале  $3 < Re < 400$  приводит к силе сопротивления, отличающейся от экспериментальных данных на  $\leq 2\%$  [1, 3]. Здесь

$$Re = \frac{2R\rho|\mathbf{v}|}{\eta} = \frac{2R|\mathbf{v}|}{\nu}, \quad \nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (3)$$

$\rho$  – плотность среды;  $\eta, \nu$  – коэффициенты ее динамической и кинематической вязкости;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости частицы относительно среды;  $R$  – радиус движущейся частицы (рассматриваются капли сферической формы);  $\rho_p$  – плотность вещества частицы; индекс  $S$  относится к “стоксовым” частицам (малых размеров, для которых число  $Re$  мало и справедлив линейный закон сопротивления:  $c_s = 9\eta/2R^2\rho_p$ ). Отметим, что вместо диаметра частицы  $2R$  в выражении для числа  $Re$  можно, разумеется, использовать радиус. Поэтому, например, в [1] и [3] числа  $Re$  при прочих равных условиях различаются в два раза.

В случае вертикального движения брызг уравнение (1) решается в квадратурах:

$$t = -\int_{w_0}^w \frac{dw'}{g + c(|w'|)w'}, \quad (4)$$

где  $w_0$  – начальная скорость частицы (капли). Но такой неявный вид решения не позволяет выразить явные зависимости таких важных параметров, как высота подъема брызг  $h$  и время их пре-

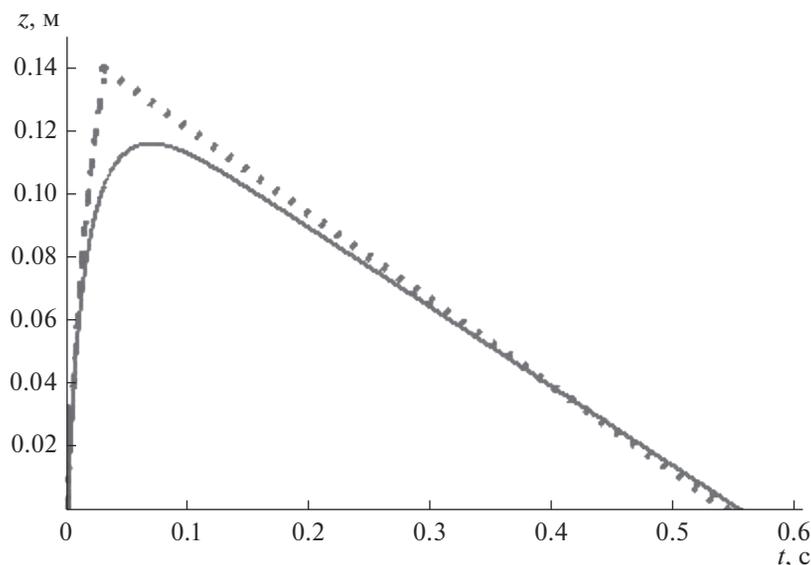


Рис. 1. Зависимость высоты капли воды от времени для рассмотренного численного примера (сплошная линия). Штриховая и пунктирная линии соответствуют двум рассмотренным асимптотикам.

бывания в воздухе  $\tau$ , от начальной скорости и размеров брызг, а также от вязкости и плотности среды. Предлагается эффективный метод приближенного решения.

Идея используемого приближения заключается в следующем. На начальной стадии подъема частиц скорость и сопротивление очень велики, и это позволяет сделать два упрощения. В уравнении (1) можно пренебречь силой тяжести, которая на этой стадии мала по сравнению с силой сопротивления. В выражении (2) при больших значениях  $Re$ , очевидно, можно пренебречь единицей в скобках. В этом случае интеграл в (4) легко вычисляется аналитически; решение имеет следующий вид:

$$w(t) \approx \frac{w_0}{(1+t/\tau_1)^{3/2}},$$

$$z(t) \approx 2w_0\tau_1 \left( 1 - \frac{1}{(1+t/\tau_1)^{1/2}} \right), \quad \tau_1 \equiv \frac{\rho_p}{\rho} \left( \frac{2R^4}{\nu w_0^2} \right)^{1/3}, \quad (5)$$

где  $z(t)$  – вертикальная координата частицы. На этой стадии скорость подъема быстро убывает со временем (при  $t = 1.5\tau_1$  уже почти в 4 раза). Далее следует переходный период, в течение которого подъем окончательно прекращается и начинается оседание; скорость установившегося оседания  $w_{\downarrow}$  хорошо изучена и для брызг малых размеров мала по сравнению с рассмотренной выше скоростью подъема. Таким образом, можно предположить, что высота подъема брызг приближенно определяется решением (5) при упоминавшемся выше

ориентировочном времени подъема порядка  $1.5\tau_1$ :

$$h \approx 0.75w_0\tau_1 = 0.75 \frac{\rho_p}{\rho} \left( \frac{2w_0R^4}{\nu} \right)^{1/3}. \quad (6)$$

Затем следует вышеупомянутый переходный период, когда медленный уже подъем сменяется медленным оседанием. За этот период высота положения брызг не успевает существенно измениться. По сравнению со временем дальнейшего оседания он в случае капель малых размеров длится недолго. Поэтому, хотя указанный переходный период трудно поддается аналитическому исследованию, он не вносит существенного вклада ни в высоту подъема брызг, ни в искомую продолжительность их пребывания в воздухе.

Согласно приведенным соображениям, порядок высоты подъема быстро движущихся брызг определяется выражением (6), а время пребывания в воздухе – того же порядка, что и время оседания:

$$\tau \sim \frac{h}{w_{\downarrow}} \approx 0.75 \frac{w_0}{w_{\downarrow}} \tau_1 = 0.75 \frac{1}{w_{\downarrow}} \frac{\rho_p}{\rho} \left( \frac{2w_0R^4}{\nu} \right)^{1/3}. \quad (7)$$

Если  $\rho_p/\rho = 10^3$ ,  $\nu = 1.5 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, то при  $w_0 = 10$  м/с [6],  $R = 0.5 \times 10^{-4}$  м получаем  $Re|_{r=0} \approx 70$ ,  $\tau_1 \approx 0.02$  с,  $h \approx 0.15$  м. Скорость установившегося оседания брызг таких размеров – порядка 0.27 м/с [2]. Таким образом, согласно (7), время пребывания таких брызг в воздухе  $\sim 0.6$  с.

Выше использовано предположение о том, что переходный период между быстрым подъемом и

установившимся оседанием не вносит большого вклада как в высоту перемещения брызг, так и в продолжительность их пребывания в воздухе. Поскольку этот период плохо поддается аналитическому исследованию, справедливость указанного предположения проверена численным решением системы (1)–(2). На рис. 1 представлена вычисленная таким образом величины  $z(t)$  для рассмотренных выше значений параметров. Видно, что порядок численных значений  $h$  и  $\tau$  и приведенных выше аналитических оценок хорошо согласуется. Как и предполагалось, большую часть времени пребывания капли в воздухе происходит ее оседание с постоянной скоростью; начальная стадия подъема хорошо описывается приближенным решением (5). Для смыкания двух рассмотренных асимптотик выбран вышеупомянутый момент времени  $t = 1.5\tau_1$ . Высота  $h$ , вообще говоря, существенно зависит от этого выбора, так что полученное приближенное решение претендует лишь на правильные порядки величин.

### ВЫВОДЫ

Установлены приближенные аналитические закономерности, относящиеся к высоте подъема и времени пребывания в воздухе мелких брызг при достаточно больших начальных значениях

числа  $Re$  (до нескольких сот). Отметим, что в русском переводе первого издания книги [4], видимо, содержится существенная ошибка (с. 71). Утверждается, что “капли с диаметром 0.01 см не могут подняться выше, чем на 1 см от поверхности, в спокойном воздухе”. В действительности в этом месте речь идет о каплях от пузырьков, размеры которых – 0.01 см (следовательно, размер капель гораздо меньше).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Волощук В.М.* Введение в гидродинамику грубодисперсных аэрозолей. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 208 с.
2. *Мазин И.П., Шметер С.М.* Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 279 с.
3. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 751 с.
4. *Kraus E.B., Businger J.A.* Atmosphere-Ocean Interaction. 2-nd edition. Oxford: Oxford Univ. Press, 1995. 362 p.
5. *Soloviev A., Lukas R.* The Near-Surface Layer of the Ocean: Structure, Dynamics and Applications. Dordrecht: Springer, 2014. 552 p.
6. *Spiel D.E.* On the birth of jet drops from bubbles bursting on water surfaces // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. № C3. P. 4995–5006.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

#### 1.1. Тематика

1.1.1. Журнал “Водные Ресурсы” принимает рукописи по следующим тематикам:

- водные ресурсы и режим водных объектов;
- гидрофизические процессы;
- гидрохимия, гидробиология, экологические аспекты;
- взаимодействие вод суши с окружающей средой;
- использование водных ресурсов, экономические и правовые аспекты.

#### 1.2. Особые замечания

1.2.1. Рукописи, не соответствующие правилам, будут возвращены авторам.

1.2.2. Все статьи публикуются в порядке очередности.

1.2.3. Рукописи авторам не возвращаются, редакция вправе не вступать в переписку с авторами.

1.2.4. Редакция ведет переписку с корреспондирующим автором, указанным в заявке.

1.2.5. Рукописи на английском языке принимаются в англоязычной версии журнала — “Water Resources”<sup>1</sup>.

#### 1.3. Форма подачи материалов

1.3.1. Рукописи в журнал подаются через авторский портал на сайте издательства<sup>2</sup>.

1.3.2. Авторам, ранее не публиковавшим статьи через указанную веб-форму, необходимо зарегистрироваться.

1.3.3. Имена первого и корреспондирующего авторов в тексте статьи должны соответствовать именам первого и корреспондирующего авторов в заявке, отправленной через авторский портал.

1.3.4. Перед подачей рукописи рекомендуется ознакомиться с правилами работы с авторским порталом<sup>3</sup>.

### 2. ТРЕБОВАНИЯ К КОМПЛЕКТНОСТИ

2.1. В редакцию журнала необходимо предоставить следующие материалы:

<sup>1</sup> <https://www.pleiades.online/en/journal/watres/>

<sup>2</sup> <https://publish.sciencejournals.ru/>

<sup>3</sup> [https://www.pleiades.online/pub/ris/AuthorPortal\\_User\\_Manual\\_ru.pdf](https://www.pleiades.online/pub/ris/AuthorPortal_User_Manual_ru.pdf)

1) экспертное заключение<sup>4</sup>, гарантирующее, что соответствующий материал не содержит секретных сведений и может быть опубликован в открытой печати;

2) лицензионный договор<sup>5</sup>, подписанный автором и всеми соавторами;

3) договор о передаче авторского права<sup>6</sup>;

4) текст статьи полностью в двух файлах:  
– в формате PDF со вставленными по месту в тексте рисунками и таблицами;

– в формате DOC (DOCX или RTF) с таблицами и рисунками в конце статьи;

5) каждый рисунок (если есть) в отдельном файле (требования к рисункам изложены в разделе “Иллюстрации”;

6) графики, построенные в EXCEL (если есть) в отдельных файлах (требования к оформлению таблиц изложены в разделе “Таблицы”.

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРЕ РУКОПИСИ

3.1. Рукопись должна содержать:

1) название, максимально конкретное и информативное;

2) полный список авторов (инициалы и фамилии);

3) полное название организации и ее почтовый адрес с указанием города, индекса и страны (название организации должно быть связано с именем автора сноской);

4) электронный адрес автора, ответственного за переписку с редакцией, — корреспондирующий автор (адрес должен быть связан с именем автора сноской);

5) аннотацию статьи, информирующую о том, какие вопросы поставлены для исследования, описывающую методы и главные результаты исследования и не содержащую ссылки на другие работы;

6) ключевые слова (5–10 слов);

7) основной текст, состоящий из нескольких разделов;

<sup>4</sup> <http://iwp.ru/upload/medialibrary/fb0/fb069498f15611-fae267f726eac34d0b.doc>

<sup>5</sup> <https://www.iwp.ru/upload/medialibrary/a7b/a7bc29b7f9b129df5d4bb0f53bb22295.doc>

<sup>6</sup> <http://iwp.ru/upload/medialibrary/0d9/0d98ba4f404dad7bc891f224fac0906d.doc>

8) выводы (заключение);

9) список литературы, отражающий современное состояние исследуемой области.

3.2. При отсутствии хотя бы одного из указанных выше элементов рукопись может быть отклонена редакцией без рассмотрения.

3.3. Благодарности могут быть размещены в конце текста статьи перед списком литературы с указанием имени и в скобках – организации.

3.4. Ссылки на поддержку работы научными фондами с указанием в скобках номеров и/или названий проектов делаются сноской от заголовка статьи.

#### 4. ТРЕБОВАНИЯ К ФОРМАТУ РУКОПИСИ

##### 4.1. Общие требования к формату

4.1.1. Текст статьи не должен превышать 40 тысяч знаков с пробелами, рисунками и списком литературы.

4.1.2. Краткие сообщения предоставляются в объеме 3–5 страниц текста, и в них не должно быть более 3 рисунков.

4.1.3. Заголовок не должен быть набран только заглавными буквами.

4.1.4. Текст не должен быть набран колонками.

4.1.5. Размер полей должен быть равен 25 мм.

4.1.6. Абзацы текста должны быть набраны с полуторным межстрочным интервалом.

4.1.7. Весь текст рукописи должен быть набран шрифтом Times New Roman, 12 pt.

4.1.8. Страницы должны быть пронумерованы.

4.1.9. Строки рукописи не должны быть пронумерованы.

4.1.10. Перед началом статьи перед заголовком указывается индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

4.1.11. Используются физические единицы и обозначения, принятые в международной системе единиц СИ (ГОСТ 8.417-2002<sup>7</sup>).

4.1.12. Нельзя заменять буквы русского алфавита сходными по начертанию латинскими буквами.

4.1.13. Буква “ё” может использоваться только в фамилиях, названиях организаций и географических названиях.

4.1.14. Десятичные числа должны быть набраны через точку (например, 0.25, а не 0,25).

4.1.15. Индексы должны быть расшифрованы в тексте.

4.1.16. Даты оформляются по образцу: число.месяц.год (например 02.05.2020).

4.1.17. Географические названия должны соответствовать атласу последнего издания.

4.1.18. Для кавычек используется обозначение “...” (не используется «...»).

4.1.19. Иностранные имена и фамилии, названия учреждений, фирм и продукции должны быть транслитерированы, в скобках должно быть дано их оригинальное написание (за исключением общеизвестных имен и имен, приведенных в списке литературы).

4.1.20. Внутритекстовые ссылки на литературный источник должны быть сделаны в виде указанного в квадратных скобках числа, соответствующего порядковому номеру источника в списке литературы (например, [5]).

4.1.21. Ссылка на несколько источников дается в квадратных скобках с номерами источников через запятую (например, [5, 7, 12]).

4.1.22. Ссылка на диапазон источников дается в квадратных скобках с номерами источников разделенных тире (например, [1–4]).

##### 4.2. Сокращения и аббревиатуры

4.2.1. Все используемые сокращения должны быть расшифрованы при первом упоминании справа в скобках (исключение — общеупотребимые сокращения).

4.2.2. Сокращения из нескольких слов необходимо разделять пробелами: 760 мм рт. ст.; т. пл.; пр. гр. (исключение — самые общеупотребимые сокращения: и т.д.; и т.п.; т.е.

4.2.3. Необходимо использовать сокращения географических координат: с.ш. (северная широта), ю.ш. (южная широта), в.д. (восточная долгота), з.д. (западная долгота).

4.2.4. Стороны горизонта сокращаются заглавными буквами без тире и дефисов (например, юго-западный — ЮЗ, а не Ю-З или ю-з).

4.2.5. Аббревиатуры или формулы химических соединений, употребляемые как прилагательные, пишутся через дефис: рН-метр, УФ-излучение (но — излучение УФ).

##### 4.3. Точки и пробелы

4.3.1. Точка не ставится после:

– “УДК”;

– заголовка статьи;

– списка авторов;

– названий таблиц;

– после сокращений размерностей: с — секунда, г — грамм, мин — минута, сут — сутки, град — градус;

– некоторых сокращений (млн — миллион);

– в подстрочных индексах ( $T_{пов}$  — температуры поверхности,  $T_{тр}$  — температура точки росы).

4.3.2. Точка ставится после:

– сносок;

<sup>7</sup> <http://docs.cntd.ru/document/1200031406>

- примечаний к таблице;
- подписей к рисункам;
- краткой аннотации;
- ключевых слов;
- сокращений: мес. – месяц, г. – год, а также город, р. – река, оз. – озеро.

#### 4.3.3. Пробелы употребляются:

- в ссылках на рисунки и таблицы: рис. 1, табл. 2;
- между знаками номера, параграфа и числом: № 1, § 5.65;
- в географических координатах: 56.5° с.ш.; 85.0° в.д.;
- в географических названиях после сокращения с точкой: р. Енисей, г. Новосибирск;
- между инициалами и фамилией: А.А. Иванов, исключение: перечисление авторов в заглавии статьи, где пробелы ставятся между инициалами: А. А. Иванов.

4.3.4. Числа с буквами в обозначениях набираются без пробелов: табл. 1, рис. 1а.

4.3.5. Кавычки и скобки не отделяются пробелами от заключенных в них слов: (при 20 м/с), (а).

#### 4.4. Дефисы и тире

4.4.1. Тире с пробелами используется для обозначения текстового тире (например: ... где  $b$  – длина сегмента).

4.4.2. Тире без пробелов используется:

- для обозначения системы, смеси, границ, зависимости (пример: система вода–порода; граница вода–дно; формула Шези–Маннинга; область Алтай–Саяны);

- для обозначения интервала “от–до”, (пример: январь–февраль; температура 30–35°C; С. 1–5, [7–12]).

4.4.3. Дефис используется без пробелов.

#### 4.5. Размерности

4.5.1. Размерности отделяются от цифры пробелом (900 км<sup>2</sup>, 5 м/с), кроме градусов, процентов, промилле: 90°, 20°C, 50%, 10‰.

4.5.2. При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится лишь для последнего числа (18–20 г/м<sup>3</sup>), за исключением угловых градусов: 5°–10° (не 5–10°).

4.5.3. Обозначение градусов Цельсия – 5°C, а не 5°.

4.5.4. Размерности при переменных выделяются запятыми ( $T$ , °C;  $Q$ , м<sup>3</sup>/год), при подлогарифмических величинах – квадратными скобками:  $\ln[\text{min}]$ .

#### 4.6. Формулы

4.6.1. Без использования внедренных рамок в предложении набираются одиночные переменные, простые математические и химические фор-

мулы ((например,  $a^2 + b^2 = c^2$ , H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), математические знаки.

4.6.2. Выносные математические формулы (оформляемые отдельной строкой) должны набираться в рамке редактора формул целиком. Набор формул из составных элементов (часть текст, часть – внедренная рамка) не допускается.

4.6.3. Формулы набираются при помощи встроенной функции WORD или с использованием редактора формул (Equation, MathType).

4.6.4. Для формул, набранных в редакторе формул, должны использоваться общие установки шрифтов, размера символов и их размещения в тексте.

4.6.5. В формулах латинские буквы печатаются курсивом (за исключением сокращения слов), русские и греческие – прямо.

4.6.6. Все числа более 10000, набранные арабскими цифрами, разбиваются пробелами по три цифры справа налево (3 556 125 758).

#### 4.7. Список литературы

4.7.1. Затековый список литературы составляется в алфавитном порядке по фамилии первого автора. Сначала указываются источники на русском языке, затем источники на иностранных языках (также в алфавитном порядке).

4.7.2. Затековый список литературы должен иметь сквозную нумерацию.

4.7.3. Должны быть указаны фамилии и инициалы авторов.

4.7.4. Фамилии и инициалы авторов выделяются курсивом.

4.7.5. Инициалы ставятся после фамилий авторов и редакторов и не разделяются пробелами между собой: *Иванов А.А., Петров В.В.*

4.7.6. Пример записи для случая публикации под редакцией: Название труда / Под ред. *В.А. Филова.*

4.7.7. Год, том, номер журнала и т.п. разделяются между собой и отделяются от соответствующих цифр пробелами: 1992. Т. 29. № 2. С. 213. или 1992. V. 29. № 2. P. 213.

4.7.8. Перед годом после названия издательства или города (если издательства нет) ставится запятая.

4.7.9. Затековая ссылка на монографию должна соответствовать следующему примеру: *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана. М.: Наука, 2009. 532 с.

4.7.10. Затековая ссылка на сборник должна соответствовать следующему примеру: *Алексеевский Н.И., Ободовский А.Г., Самохин М.А.* Механизмы изменения уровней воды в реках // Эрози-

онные и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 2005. Вып. 4. С. 216–237.

4.7.11. Зате́кстовая ссылка на периодическое издание (журнал, серийный труд и т.д.) должна соответствовать следующему примеру: *Эдельштейн К.К., Смахтина О.Ю.* Генетическая структура речного стока и химико-статистический метод выделения ее элементов // Вод. ресурсы. 1991. № 5. С. 5–20.

4.7.12. Зате́кстовые ссылки на диссертации и авторефераты диссертаций должны соответствовать следующему примеру: *Иванов В.В.* Условия формирования, гидрологоморфометрические зависимости и деформации относительно прямолинейных, неразветвленных русел. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1989. М.: 23 с.

4.7.13. Не допускаются ссылки на неопубликованные работы и отчеты.

#### 4.8. Таблицы

4.8.1. Каждая таблица располагается на отдельном листе после текста статьи и списка литературы.

4.8.2. Таблицы без ячеек, набранные с помощью пробелов и (или) табуляций не принимаются.

4.8.3. Таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте.

4.8.4. После номера следует название таблицы.

4.8.5. Первая ссылка на каждую таблицу в тексте должна быть выделена серым фоном (**табл. 1** и т.д.).

4.8.6. Все столбцы в таблицах должны быть разделены вертикальными линиями.

4.8.7. Горизонтальными линиями выделяются только шапка и последняя строка таблицы.

4.8.8. Размер шрифта в таблицах – 10 pt.

4.8.9. Слово “таблица” и ее номер пишутся полужирным шрифтом, название таблицы – светлым.

4.8.10. Примечание к таблице дается после ее заголовка в скобках без слова “примечание”.

4.8.11. Сноски под таблицами пишутся шрифтом в 9 pt.

#### 4.9. Иллюстрации

4.9.1. Все рисунки должны быть расположены в конце статьи с соответствующими подрисуночными подписями.

4.9.2. Каждый рисунок должен быть на отдельном листе.

4.9.3. Рисунки не должны быть сгруппированы по ячейкам таблицы или каким-либо аналогичным способом.

4.9.4. Каждый рисунок должен быть представлен отдельным файлом формата JPEG.

4.9.5. Карты и схемы с мелкими деталями можно предоставить в отдельных файлах формата TIFF.

4.9.6. Названия файлов с рисунками должны содержать фамилию первого автора и порядковый номер рисунка в тексте (например, “Иванов\_рис1.jpeg”).

4.9.7. Первая ссылка на каждый рисунок должна быть выделена серым фоном (**рис. 1** и т.д.).

4.9.8. Подрисуночные подписи должны быть набраны шрифтом в 10 pt. Допускается использование шрифта в 9 pt или 8 pt (карты, чертежи).

4.9.9. Оси на графиках должны быть подписаны.

4.9.10. Надписи одного порядка (надписи на осях, номера кривых и т.п.) должны быть набраны одним размером и шрифтом.

4.9.11. Громоздкие надписи на рисунках следует заменять номерами или символами курсивом, а их расшифровку выносить в подписи к рисункам.

4.9.12. Обозначения частей рисунка заключаются в скобки и пишутся прямо: (а), (б) и т.д., располагаются над соответствующими частями рисунка посередине.

4.9.13. На картосхемах пишутся:

- названия крупных водных объектов (моря, океаны) — прописными буквами курсивом;
- названия рек, озер — строчными курсивом;
- горных стран и хребтов — прописными прямо;
- населенных пунктов — прямо и только горизонтально.

4.9.14. Подрисуночные подписи должны соответствовать следующему примеру: **Рис. 2.** Профили дна устьевого шельфа против северной (а), центральной (б) и южной (в) частей дельты Годавари.

4.9.15. Фон рисунка должен быть белого цвета.

4.9.16. Графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах; они должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

4.9.17. Полутонные иллюстрации должны иметь разрешение не ниже 300 dpi.

4.9.18. Комбинированные полутонные/штриховые иллюстрации должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

4.9.19. Толщина линий на иллюстрациях должна быть не меньше 0.5 pt.

4.9.20. Надписи на иллюстрации не должны соприкасаться с ее другими частями.

4.9.21. Публикация цветных иллюстраций в печатной версии журнала платная.

## 5. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ

5.1. Все поступившие в редакцию рукописи проходят анонимное рецензирование.

5.2. Если статья возвращается рецензентом с замечаниями, то она направляется автору для доработки.

5.3. Доработанная статья, а также ответ на замечания рецензента должны быть присланы в редакцию в течение двух месяцев с момента направления авторам рецензии. По истечении этого срока она рассматривается как вновь поступившая.

5.4. Доработанная статья подается в редакцию с полным комплектом документов, перечисленным в п. 2.

5.5. Текст доработанной рукописи подлежит проверке на соответствие требованиям настоящих правил.

5.6. Окончательное решение о принятии статьи выносится редакционной коллегией журнала.

## 6. ЮРИДИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

6.1. Если в статье используются материалы (рисунки, таблицы) ранее опубликованные в других источниках (в том числе, если они публиковались автором статьи), должны быть предоставлены письменные разрешения авторов этих материалов на публикацию в журнале “Водные ресурсы”. Ответственность за нарушение авторских прав полностью лежит на авторах предоставленных материалов.

6.2. Отправка рукописи в редакцию журнала “Водные ресурсы” по почте, через авторский портал на сайте либо любым другим способом, означает согласие авторов с настоящими правилами.