

ISSN 2587-5566

Том 87, Номер 6

Ноябрь - Декабрь 2023



ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 87, номер 6, 2023

Специальный выпуск: Гидроэкологические проблемы в бассейне Волги
и их последствия для Каспия

Выпускающие редакторы: Г. М. Черногаева, Н. И. Коронкевич, Е. А. Барабанова

От редакторов 783

ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВОЛГИ

- Валдайская возвышенность как колыбель Волги
А. А. Тишков 786
- Сток Волги в эпохи глобального потепления
А. Г. Георгиади, И. П. Милукова 804
- О соотношении климатических и антропогенных факторов в изменении стока Волги
Н. И. Коронкевич, А. Г. Георгиади, Е. А. Барабанова, Е. А. Кашутина, И. П. Милукова 825
-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

- Оценка энергетической эффективности функционирования водохранилищ
Верхневолжского и Камского каскадов в начале XXI столетия
С. В. Ясинский, И. С. Соболев, Д. Н. Хохлов, М. А. Фасахов, А. А. Шайдулина 835
- Водопотребление и водоотведение в бассейне реки Волги, их влияние на качество воды
А. П. Демин 847
- Водные проблемы Нижней Волги: основные факторы и компенсирующие мероприятия
М. В. Болгов, А. И. Беляев 862
-

КАЧЕСТВО ВОД

- Интегральная оценка качества воды в бассейне Волги по данным мониторинга в XXI в.
Г. М. Черногаева, Л. Р. Журавлева, Ю. А. Малеванов 875
- Реконструкция долговременных изменений в двух верхневолжских водохранилищах
по результатам комплексного анализа донных отложений
Л. В. Разумовский, Т. Н. Кушнарева, В. Л. Разумовский, А. В. Анисимова 885
- Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах
*М. Г. Гречушникова, И. А. Репина, Н. Л. Фролова, С. А. Агафонова, В. А. Ломов,
Д. И. Соколов, В. М. Степаненко, В. А. Ефимов, А. А. Мольков, И. А. Капустин* 899
-

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

- Гидрометеорологические показатели состояния российского сектора
Каспийского моря в условиях меняющегося климата
Е. В. Островская, Е. В. Гаврилова, И. В. Гонтовая, В. О. Татарников, М. А. Очеретный 914
- Многолетние изменения уровня Каспийского моря и современные варианты
их прогнозирования
В. Б. Ермаков 930
-

Contents

Volume 87, No. 6, 2023

**Special Issue: Hydroecological Problems in the Volga River Basin
and Their Impact on the Caspian Sea Ecosystem**

Guest Editors: G. M. Chernogaeva, N. I. Koronkevich and E. A. Barabanova

Editors' Foreword 783

Formation of the Volga River Flow

Valdai Hills as the Cradle of the Volga River

A. A. Tishkov 783

The Volga River Water Runoff in Warm Epochs

A. G. Georgiadi and I. P. Milyukova 786

On the Ratio of Climatic and Anthropogenic Factors in the Change
of the Volga River Runoff

*N. I. Koronkevich, A. G. Georgiadi, E. A. Barabanova,
E. A. Kashutina, and I. P. Milyukova* 825

Water Management

Energy Efficiency Assessment of the Upper Volga and Kama Cascades of Reservoirs
at the Beginning of the 21st Century

S. V. Yasinsky, I. S. Sobol, D. N. Khokhlov, M. A. Fasakhov, and A. A. Shaydulina 835

Water Consumption and Water Discharge in the Volga River Basin and
Their Impact on Water Quality

A. P. Demin 847

Water Problems of the Lower Volga: Main Factors and Compensating Measures

M. V. Bolgov and A. I. Belyaev 862

Water Quality

Integral Assessment of Water Quality in the Volga River Basin According to Monitoring Data
in the 21st Century

G. M. Chernogaeva, L. R. Zhuravleva, and Y. A. Malevanov 875

Long-Term Changes Reconstruction in Two Upper Volga Reservoirs Based on the Bottom
Sediments Comprehensive Analysis Data

L. V. Razumovskii, T. N. Kushnareva, V. L. Razumovskii, and A. V. Anisimova 885

Methane Concentration and Fluxes in Volga River Reservoirs

*M. G. Grechushnikova, I. A. Repina, N. L. Frolova, S. A. Agafonova, V. A. Lomov, D. I. Sokolov,
V. M. Stepanenko, V. A. Efimov, A. A. Mol'kov, and I. A. Kapustin* 899

The Caspian Sea Condition Change

Hydrometeorological Parameters of the Marine Environment in the Russian Sector
of the Caspian Sea under Changing Climate

E. V. Ostrovskaya, E. V. Gavrilova, I. V. Gontovaya, V. O. Tatarnikov, and M. A. Ocheretnyi 914

Long-Term Changes in the Level of the Caspian Sea and Modern Options for Their Forecasting

V. B. Ermakov 930

ОТ РЕДАКТОРОВ Editors' Foreword

DOI: 10.31857/S2587556623060110, EDN: AYODIS

Настоящий спецвыпуск журнала “Известия РАН. Серия географическая” посвящен гидро-экологическим проблемам в бассейне Волги и их последствиям для Каспия. Значение Волги и ее бассейна для нашей страны трудно переоценить. Именно в бассейне Волги возникли российское государство и его столица — Москва. Недаром в народе Волгу называют “Волга-матушка”. На берегах Волги и ее притоков происходило большинство важнейших событий российской истории. Это и освобождение от татаро-монгольского ига, польского в XVII и французского в XIX в. нашествий, разгром немецко-фашистских войск под Москвой и Сталинградом в Великой Отечественной войне, формирование экономического и культурного ядра нашей страны. В настоящее время в бассейне Волги при площади 1360 тыс. км² (около 8% территории РФ) проживает более 60 млн человек или около 40% населения России, сосредоточено 45% промышленного и около 50% сельскохозяйственного производства страны. Вместе с судоходными притоками и каналами Волга образует одну из крупнейших воднотранспортных систем в мире. Бассейн реки включает полностью или частично 37 субъектов РФ, в том числе 27 областей и 8 республик, Пермский край и Москву. Небольшой участок в устье входит в состав Казахстана.

Волга — крупнейшая река Европы. Ее средний многолетний сток в створе Волгограда составляет по данным Государственного гидрологического института 238 км³/год. Несмотря на столь большой объем воды, Волга не справляется с огромной, не всегда рациональной антропогенной нагрузкой на водные ресурсы. Ее экологическое состояние, как и многих притоков, неудовлетворительно. Возникают острые проблемы водообеспечения населения и хозяйства. Климатические факторы также в отдельные годы усугубляют сложившуюся ситуацию. Все это весьма неблагоприятно сказывается на состоянии крупнейшего в мире замкнутого водоема — Каспийского моря. Одна из главных проблем Волги, ее притоков и Каспия — загрязнение сточными водами и диффузным стоком с водосборной территории, делающими их воды непригодными или малопригодными для многих видов водопользования. Загрязнение вод, а также регулирование стока Волжско-Камским каскадом

водохранилищ наряду с браконьерством нанесло чрезвычайно сильный удар по рыбному стаду, особенно самых ценных осетровых рыб, по запасам которых Волга и Каспий занимали некогда ведущее положение в мире. Во многие годы в низовьях Волги оказывается невозможным удовлетворить запросы основных водопользователей — гидроэнергетики, рыбного и сельского хозяйства, притом, что приоритет при распределении воды все же отдается гидроэнергетике, а не экологическим запросам. Заметим, что и естественный режим Волги и ее притоков не всех устраивал и в прошлом из-за наводнений и, напротив, маловодий в ее верхнем течении, что препятствовало судоходству.

Для решения экономических и экологических проблем в бассейне Волго-Каспия давно уже неоднократно задумывались и предпринимались различные мероприятия. Вначале они предназначались для снабжения водой населения и хозяйства, а также для обеспечения судоходства. Еще у Петра I возникла идея соединить каналом Волгу с притоком Дона р. Иловлей. Идея соединения Волги и Дона судоходным каналом была реализована, как известно, в середине XX столетия. В 1810 г. была создана Мариинская водная система (ныне после реконструкции — Волго-Балтийский водный путь). В 1845 г. построено Верхневолжское водохранилище. Но самые крупные проекты стало возможным реализовать лишь в XX в. и то не сразу после их возникновения. В 1920 г. при разработке плана ГОЭЛРО предполагалось создание Нижегородской ГЭС, строительство которой было осуществлено через 35 лет. В 1921 г. был разработан план ирригации и электрификации Поволжья, предусматривающий борьбу с засухой, создание на Волге и Каме каскада ГЭС, обеспечение единой воднотранспортной системы. В дальнейшем он получило название Большая Волга. В 1933 г. проект обсуждался на специальной сессии АН СССР, посвященной проблеме Волго-Каспия, а затем прорабатывался экспертными комиссиями Госплана. Уже в конце 1930-х годов началось строительство Угличского и Рыбинского водохранилищ. Электроэнергия Рыбинской ГЭС сыграла важную роль в обороне Москвы в 1941 г. Водообеспечение Москвы к этому времени в значительной мере осуществлялось построенным в

1937 г. каналом Москва–Волга (ныне им. Москвы) после создания Иваньковского гидроузла в верховьях Волги. В основном же Волжско-Камский каскад был создан в 1960–1970-х годах. Гидротехническое строительство в бассейне Волги позволило решить целый ряд проблем стабильного водообеспечения населения и хозяйства. Вместе с тем оно породило ряд проблем, в том числе экологических – затопление и подтопление большого числа населенных пунктов с переселением населения на новые места жительства, ценных пойменных земель, ущерб для рыбного хозяйства, снижение стока Волги и Камы и др. Развитием проекта Большой Волги стал так называемый сталинский план преобразования природы, в значительной мере затрагивающий бассейн Волги и направленный на повышение плодородия земель за счет более продуктивного использования водных ресурсов водосборов в результате осуществления агролесомелиоративных мероприятий на колхозных и совхозных полях и создания государственных лесных полос. Положительный эффект этого плана, выражающийся в повышении урожайности сельскохозяйственных полей, стал сказываться уже через несколько лет, однако с середины 1950-х годов этот план перестал осуществляться, лесные полосы остались без присмотра. Стали вырубаться, и их положительный эффект к настоящему времени на большинстве территории свелся практически к нулю.

Уже на специальной сессии АН СССР в 1933 г. поднимался вопрос о пополнении водных ресурсов Волги за счет северных европейских рек. Идея межзонального перераспределения стока обрела реальную основу, когда в Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1976–1980 гг. было записано: “Провести научные исследования и осуществить на этой основе проектные проработки, связанные с проблемой переброски части стока северных и сибирских рек в Среднюю Азию, Казахстан и в бассейн Волги”. В развитие этого решения ЦК КПСС и Совет министров СССР приняли постановление, обязывающее Академию наук, Министерство мелиорации и водного хозяйства провести соответствующие исследования по научному обоснованию проектов. К разработке этого обоснования было привлечено более 150 проектных и научно-исследовательских организаций страны. Для Волги на первом этапе предполагалось перебросить $19.1 \text{ км}^3/\text{год}$ из бассейнов Онеги, Сухоны, Невы с основной целью – обеспечить развитие орошаемого земледелия без ущерба для стока Волги и уровня Каспия, тем самым решая и природоохранные функции Волги и Каспия. Проекты переброски части стока как европейских, так и азиатских рек подверглись ожесточенной критике в основном по финансовым, экологическим, эколого-культурным соображениям, причем по ев-

ропейской переброске главным образом в отношении северных рек. Несмотря на природоохранные мероприятия, предусмотренные в проектах, в том числе после их обсуждения, как европейский, так и азиатский проекты были, в конечном, счете отвергнуты.

Со временем, хотя и с перерывами, все большую актуальность в бассейне Волги приобретали проблемы рыбного хозяйства и качества воды. Весьма остро они ощущались еще в конце XIX столетия в связи с перевозкой нефтепродуктов по Волге и их большими потерями при этом, сильно загрязнявшими Волгу и весьма негативно сказывавшимися на рыбном стаде. По мере совершенствования судов и использовании железных дорог и трубопроводов для транспортировки нефтепродуктов эти проблемы временно стали менее острыми, но вновь приобрели актуальность в связи с быстрым нарастанием различных видов антропогенной нагрузки на водные ресурсы с 1960-х годов. Некоторое время ущерб для рыбного стада удавалось существенно снизить за счет строительства большого числа рыбообразовных заводов и очистных сооружений. Важную роль сыграло Постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР 1972 г. “О мерах по предотвращению загрязнения бассейнов рек Волги и Урала неочищенными сточными водами”. Но полностью решить указанные проблемы не удалось. Не решены они были и после распада СССР и связанного с ним экономического кризиса, приведшего к закрытию большого числа предприятий, сточные воды которых загрязняли Волгу и ее притоки, так как одновременно снизилась эффективность работы очистных сооружений и никак не очищались загрязнения, поступающие с водосборов. Не принесла должного эффекта и Программа “Возрождение Волги”, разработанная в конце 1990-х годов. В ней предусматривалась и модернизация вододельителя, построенного в 1977 г., для обеспечения водой нерестилищ осетровых и других рыб в дельте Волги. Дав кратковременный эффект, Программа была свернута в начале XXI столетия. Затем появились федеральные целевые программы: “Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 гг.” (2008 г.), “Водная стратегия РФ на период до 2020 г.” (2009 г.), затрагивающие и бассейн Волги. В рамках федеральной программы “Экология” разработан проект “Оздоровление Волги на период 2018–2024 гг.”. В 2006 г. был обновлен Водный кодекс Российской Федерации. Все эти документы, как и ряд других, не привели, однако, к 2023 г. к кардинальному решению водных проблем Волги и Каспия, так как запланированные мероприятия не были выполнены в полном объеме из-за значительно меньшего, чем планировалось, финансирования, недостаточного обновления очистных сооружений и, как следствие, невысо-

кой во многих случаях эффективности их работы, а также из-за того, что ничего не было предусмотрено по борьбе с диффузным загрязнением. В настоящее время разрабатывается продолжение программы “Оздоровление Волги” до 2030 г. Очень важно, чтобы при этом были учтены все недостатки предшествующих программ и мероприятий.

Цель настоящего спецвыпуска — обобщение некоторых результатов исследования современных гидроэкологических и геоэкологических проблем в бассейне Волги, а также Каспийском море по материалам расширенного научного семинара, проведенного в Институте географии РАН 9 и 16 марта 2023 г. В нем приняли участие более 80 человек. Было заслушано 7 докладов, состоялось их обсуждение. Материалы докладов и дискуссии с привлечением авторов еще четырех статей представлены в настоящем спецвыпуске. Предисловие к нему с ретроспективой водных проблем в бассейне Волги написано инициатором семинара Г.М. Черногаевой, Н.И. Коронкевичем, Е.А. Барабановой. Условиям формирования стока Волги на Валдайской возвышенности посвящена статья А.А. Тишкова. Динамика стока Волги в эпоху глобального потепления рассмотрена А.Г. Георгиади и И.П. Милуковой. Соотношение климатических и антропогенных факторов в изменении стока Волги оценено Н.И. Коронкевичем с соавторами. В статье С.В. Ясинского и др. приведена оценка энергетической эффективности работы Верхневолжских и Камских водохранилищ. А.П. Демин рассмотрел водопотребление в бассейне Волги. М.В. Болгов и А.И. Беляев выявили основные проблемы Нижней Волги и рассмотрели возможные пути их решения. Интегральная оценка качества речных вод в бассейне Волги по данным Государственного мониторинга и проблемы этого мониторинга оценены Г.М. Черногаевой с соавторами. Л.В. Разумовский остановился на проблемах гидробиологического мониторинга в бассейне Верхней Волги. М.Г. Гречушников с соавторами дали оценку содержания и потоков метана в волжских водохранилищах. Две статьи посвящены Каспию. В коллективной статье Е.В. Островской и др. рассмотрено состояние гидрологических и гидрохимических показателей Северного Каспия. В статье В.Б. Ермакова дана оригиналь-

ная трактовка колебаний уровня Каспийского моря и их прогноз.

Следует признать, что в спецвыпуске освещены далеко не все проблемы Волги и Каспия. Ряд имеющихся сведений требуют обновления и дальнейшего развития с учетом меняющейся гидроклиматической и антропогенной ситуации. По-прежнему проблемным остается совершенствование природопользования как во всем бассейне Волги, так и в самой Волге в частности. Актуальна проблема перераспределения попусков из водохранилищ, в первую очередь Волгоградского, в пользу большего удовлетворения экологических требований. Требуется совершенствования мониторинг состояния окружающей среды и обобщения его результатов, в том числе водных ресурсов. Очень важны данные о гидрологической роли различных процессов и мероприятий на водосборе Волги. В этой связи целесообразно было бы реанимировать и расширить сеть воднобалансовых станций в бассейне Волги и программу наблюдений на них с учетом современных реалий. Как для Волги, так и для других рек России во многом остается нерешенным вопрос экологического нормирования качества вод и путей достижения соответствующих показателей. Следовало бы как можно скорее разработать нормативы по величине экологического стока и допустимому изъятию водных ресурсов Волги. Во многом дискуссионным является генезис колебаний уровня Каспийского моря.

Вместе с тем полагаем, что представленная в спецвыпуске достоверная научно-обоснованная информация о состоянии водных объектов волжского бассейна и Каспийского моря, качестве водных ресурсов, особенностях формирования речного стока в условиях его регулирования будет способствовать решению водных проблем Волги и Каспия.

Г. М. Черногаева, Н. И. Коронкевич,

Е. А. Барабанова,

Институт географии РАН, Москва, Россия

G. M. Chernogaeva, N. I. Koronkevich

and E. A. Barabanova,

*Institute of Geography, Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia*

ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВОЛГИ

УДК 551.4:556.5(502.4)

ВАЛДАЙСКАЯ ВОЗВЫШЕННОСТЬ КАК КОЛЫБЕЛЬ ВОЛГИ

© 2023 г. А. А. Тишков*

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: tishkov@igras.ru*

Поступила в редакцию 27.04.2023 г.

После доработки 13.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Обсуждается роль Валдайской возвышенности в целом и Валдайского поозерья в обеспечении полноводности истоков р. Волги и ее современные тренды на фоне климатических изменений. Показано, что водосберегающие и водорегулирующие функции ландшафта возвышенности исходно определяются двумя генеральными свойствами рельефа — его инвариантностью как “каркаса жизни” и его изменчивостью в ходе эволюции под воздействием эндогенных и экзогенных факторов. “Колыбель Волги” применительно к Валдайской возвышенности и конкретно к Балтийско-Каспийскому водоразделу — это совокупность условий, позволяющих формировать сток в верховьях реки. Среди главных из них (определяющих устойчивый сток в среднемноголетнем объеме), выделены: состояние рек, озер и болот; антропогенные воздействия (регуляция стока, вырубка леса и распашка послелесных земель на водосборе, застройка и загрязнение береговой линии и пр.) и в целом территориальная охрана природы (создание заповедных участков в истоках реки). По материалам мониторинга климата и гидрологического режима региона, осуществляемого Валдайским филиалом Государственного гидрологического института, выявлены основные тренды факторов стока Волги в ее верховьях. Показана доля водорегулирующих, водосберегающих и ассимиляционных функций природных вод в общем объеме экосистемных услуг ландшафтов Валдайской возвышенности. Сделан вывод, что современный рост рекреационного воздействия на водосборы истоков Волги может снизить позитивный эффект от функционирования на них особо охраняемых природных территорий. Приоритетными вопросами сохранения “колыбели Волги” должно стать регламентирование рекреационных нагрузок на ландшафты Валдайской возвышенности, реабилитация нарушенных лесных экосистем и мониторинг объемов и качества стока.

Ключевые слова: Валдайская возвышенность, Валдайское поозерье, Новгородская и Тверская области, водораздел, истоки Волги, бассейн, сток реки, водосберегающие и водорегулирующие функции ландшафта, экосистемные услуги, национальный парк Валдайский

DOI: 10.31857/S2587556623060134, **EDN:** BASDRG

ВВЕДЕНИЕ

Еще в XIX в. выдающиеся географы профессор Д.Н. Анучин и генерал-лейтенант А.А. Тилло одними из первых обратили внимание на Валдайскую возвышенность как на Главный водораздел Восточно-Европейской равнины — область истоков рек бассейнов Балтийского, Черного и Каспийского морей, в том числе р. Волги (Анучин, 1897; Озерова и др., 2015; Тилло, 1892). А.А. Тилло составил “Гипсометрическую карту Европейской России” (1 : 2520000), вместе с Д.Н. Анучиным разработал инструкцию для экспедиции по изучения истоков главнейших рек Европейской России (1894 г.), а для словаря Брокгауза и Эфрона — карту бассейнов рек европейской части России, включая бассейн р. Волги (1 : 15300000), которая была опубликована уже после его смерти благодаря стараниям секретаря Императорского Русского географического общества (РГО) Ю.М. Шо-

кальского. В архиве РГО в Санкт-Петербурге до сих пор хранятся неопубликованные материалы экспедиций к истокам рек и рекомендации по их охране.

Насколько в XXI в. актуально возвращаться к проблеме выдающейся гидрологической функции Валдайской возвышенности и сохранения здесь истоков рек разных бассейнов? Ответ лежит в разных плоскостях развития отечественной географии и ее связей с практикой, особенно с проблемами водопользования, регулирования стока и территориальной охраны природы. Во-первых, как никогда, в европейской части России обострилась ситуация с сохранностью именно истоков рек, гибелью малых рек и необходимостью их охраны. И здесь интерес к Главному водоразделу, определяющему во многом состояние поверхностных вод Европейской России, был бы вполне оправдан. Во-вторых, реализация федеральных

проектов “Оздоровление Волги” с бюджетом 119.458 млрд руб. (на 13.09.2022) и “Сохранение уникальных водных объектов” с бюджетом 13.330 млрд руб. (на 13.09.2022) ориентированы в первом случае на Среднюю и Нижнюю Волгу, а во втором — на уникальные водные объекты вне Главного водораздела. И, в-третьих, в отличие от опыта многих стран и некоторых регионов России, водосберегающие, водорегулирующие и обеспечивающие качество воды функции водораздела для регионов “ниже по течению” никак не компенсируются (Петрова, Тишков, 2002). Хотя для этого есть все основания: Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ, а также Постановление Правительства Российской Федерации “О ставках платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности...” от 26 декабря 2014 г. № 1509 (с изменениями 24 марта 2022 г.), где для 2023 г. отмечен повышающий коэффициент — 3.22, и плата 226 руб./м³. Так, еще в 1990-х годах ФГУП “Канал им. Москвы” ежегодно забирал из оз. Велье (Новгородская обл., национальный парк Валдайский) по “волжскому пути” до 130 млн м³ воды для обеспечения деятельности Ивановской ГЭС, санитарной очистки русла р. Москвы и на питьевые нужды столицы, за которые не платил, а сам получал от Московского водоканала 27 коп. за 1 м³. Это прямое трансрегиональное изъятие объемов чистой, фактически не требующей доочистки, воды из водоемов федеральной особо охраняемой природной территории (ООПТ). Прецедент получил юридическую оценку¹, но проблема так и не решена ни конкретно для парка, ни в отношении компенсации водосберегающей, водорегулирующей и других гидрологических функций Валдайской возвышенности в целом.

Водосберегающая, водорегулирующая и ассимиляционная в отношении природных вод функции экосистем Валдайской возвышенности на количественном (физическом и монетарном) уровне, несомненно, могут быть оценены и, что называется, “поставлены на баланс” как составляющая часть природного капитала России и ее регионов, на территории которых располагается Главный водораздел — Новгородской, Тверской и Ленинградской областей. Но для федерального и региональных бюджетов сохранение лесных, луговых, болотных и озерных экосистем в истоках рек, в том числе р. Волги, а также содержание ООПТ остается дополнительной нагрузкой (по нашим оценкам — не менее 100–200 руб. на 1 га в год при среднем модуле стока 0.12 л/с/га). Плата за сохранение истоков рек, водорегулирующие и

ассимиляционные функции экосистем верховий позволила бы сполна компенсировать эти затраты.

Выдающуюся роль в изучении гидрологии Валдая сыграл Государственный гидрологический институт (ГГИ). Им в 1933 г. организованы здесь мониторинговые исследования и создана Валдайская воднобалансовая станция (ныне Валдайский филиал ГГИ). Одним из инициаторов ее создания был М.И. Львович — будущий заведующий отделом гидрологии Института географии АН СССР. В 1933 г. научный сотрудник 1-го разряда института И.В. Молчанов опубликовал монографию “Озера и сапропелитовые месторождения Валдайской возвышенности” (Молчанов, 1933), где провел детальный анализ гипсометрии озер Балтийско-Каспийского водораздела Валдайской возвышенности и провел оценку запасов сапропеля. И М.И. Львович, и И.В. Молчанов еще 90 лет назад с разных позиций пытались осмыслить гидрологический феномен Валдайской возвышенности, интуитивно понимая ее выдающуюся роль в определении полноводности стекающих с нее рек. В наши годы наличие в центре возвышенности экспериментальных объектов ВФ ГГИ и ежегодные оценки стока вроде бы “закрывают” этот вопрос. Но получается, что вполне обоснованные выводы об определяющем значении рельефа и его генезиса в формировании стока Волги, сформулированные еще Д.Н. Ануциным и А.А. Тилло (затянувшаяся “озерная” фаза развития, непостоянные уровни озер, значительные уклоны рек и их высокая эродирующая сила, наследование доледникового рельефа и др.), не получили должного развития и только сейчас постепенно начинают подтверждаться [см., например, публикации о речном генезисе оз. Селигер (Konstantinov et al., 2021)].

Институт географии РАН за свою долгую историю неоднократно возвращался к исследованиям Валдайской возвышенности как геоморфологического, гидрологического, лимнологического, почвенного, биogeографического и экономико-географического феномена. В 1960-х годах валдайские озера изучал руководитель лимнологической группы института профессор Л.Л. Россолимо с сотрудниками (Покровская и др., 1983; Россолимо, 1977; Шилькрот, 1979), которые установили детально процессы их эвтрофикации. В эти же годы в районе оз. Селигер активно работали сотрудники отдела физической географии института В.С. Преображенский, Ю.А. Веденин, Н.С. Казанская и др., исследования которых послужили основой для становления рекреационной географии в СССР и России и создания в регионе системы ООПТ (Веденин, 1982; Казанская и др., 1977; Преображенский, 1975). Эстафета исследований оз. Селигер была продолжена в наши дни сотрудниками этого же отдела и лаборатории гидрологии института — Т.М. Кудериной, Г.С. Шилькрот, С.В. Шапорен-

¹ <https://www.sostav.ru/news/2004/06/22/36/> (дата обращения 02.03.2023).

ко и др. Вышла их коллективная монография “Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях” (Структура ..., 2004), в отдельных публикациях рассмотрена роль озера как второго истока р. Волги (Шاپоренко и др., 2002), обоснованы перспективы мониторинга его состояния в условиях заповедывания и сокращения площади сельскохозяйственных угодий на водосборе.

С начала 1970-х годов здесь стали проводить исследования сотрудники лаборатории биогеографии и отдела физической географии — М.В. Глазов, А.А. Тишков, О.В. Морозова, Н.Г. Царевская, Е.А. Белоновская, Е.А. Шварц, А.Д. Арманд и др. (Белоновская и др., 2014, 2016, 2018, 2019, 2022; Глазов, 2004; Морозова и др., 2010; Тишков, 1979, 1994, 2005 и др.). В последние годы к Валдаю проявляют интерес лаборатории эволюционной географии и палеоархивов природной среды (Новенко, 2016; Konstantinov et al., 2021) и экономгеографы Института географии РАН, которые включили его в проект “Путешествие из Петербурга в Москву: 222 года спустя” (Нефедова, Трейвиш, 2015).

Автор проводит биогеографические исследования на Валдайской возвышенности почти 50 лет, участвовал в обосновании и создании национального парка Валдайский (1990 г.), постоянно привлекается как эксперт для решения проблем территориальной охраны и сохранения водных ресурсов региона. Более 30 лет назад мы определили Валдайскую возвышенность как “ключевой регион устойчивого развития” для европейской части России. Критерием придания ей такого статуса было признание стабилизирующего влияния на природу и хозяйство прилегающих к возвышенности равнин на сотни и тысячи километров вокруг — через сток рек, формирование регионального и местного климата, а ранее — благодаря миграциям биоты из “валдайского рефугиума” лесной флоры (Климанов и др., 2010; Кожаринов, 1994; Орлов и др., 2007). Как минимум с пяти позиций — геоморфологической, гидрологической, палеогеографической, биогеографической и археологической, Валдайская возвышенность претендует на то, чтобы считаться целостным и уникальным географическим феноменом, где генезис геоморфологической системы повлиял на генезис всех элементов местного ландшафта (Геоморфология ..., 1969; Эволюция ..., 2008). Кроме того, оценка экосистемных услуг ее ландшафта (Тишков, 2005; Тишков и др., 2019) показала, что их объем здесь существенно выше, чем на прилегающих территориях, именно за счет водорегулирующих и водосберегающих функций Главного водораздела. В понимании этого личная мотивация пересекается с академической.

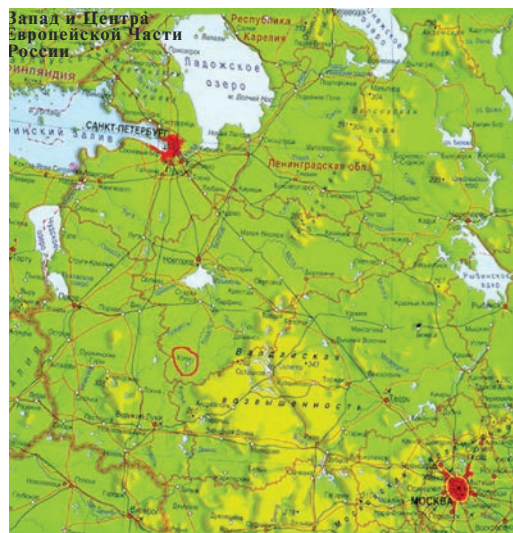


Рис. 1. Валдайская возвышенность.

В настоящем анализе мы акцентируем внимание на выборе Валдайской возвышенности и Валдайского поозерья, в том числе в границах национального парка Валдайский, как объектов исследований состояния истоков Волги (рис. 1). Он эмпирически демонстрирует определяющее значение рельефа как “каркаса жизни”, своеобразной ландшафтной инварианты, а с другой стороны — подтверждают представление о рельефе Главного водораздела как об относительно молодой “эволюционирующей” части ландшафта, необратимо меняющейся в процессе саморазвития и накопления донных отложений и/или под воздействием экзогенных (вслед за изменчивостью природных и антропогенных факторов) процессов, в том числе эрозионных. Только в таком дуалистическом представлении можно понять природу Валдайской возвышенности как области истоков Волги, которые, возможно, менялись по вектору и объемам стока в течение голоцена и сохраняют все перспективы дальнейшей природной и антропогенной изменчивости, прогнозировать которую необходимо. Именно эта феноменология интересна автору.

Настоящая статья посвящена анализу роли Валдайской возвышенности и Валдайского поозерья в формировании стока Волги и оценке водосберегающих и водорегулирующих экосистемных услуг их ландшафтов.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА

Понятие “колыбель Волги” применительно к Валдайской возвышенности в данной статье определяется как совокупность условий — палеогеографических, геоморфологических, гидроло-

гических, ландшафтных и биогеографических, позволяющих формировать сток реки непосредственно в самых верховьях до ее выхода на равнину. В статье этот термин в соответствии с представлениями “Словаря русского языка” (1953) трактуется как “*высокое место возникновения, зарождения чего-либо...*” (с. 250). В соответствии с этим методически и методологически правильнее говорить об иерархии масштабов анализа и синтеза — Валдайская возвышенность, поозерье Балтийско-Каспийского водораздела с водоразделами второго порядка и собственно “узкий коридор” водораздела верховьев Волги (Верхневолжского водохранилища, оз. Селигер и до впадения в нее р. Тверцы) между истоками рр. Пола, Западная Двина, Днепр и притоков Мсты.

Верховья Волги в границах Валдайской возвышенности сравнительно трудно очертить, даже используя данные о границе Балтийско-Каспийского водораздела, уровнях валдайских озер и высотах местных наклонных долин. Оценка площади бассейна Волги в разных источниках неоднозначна, поэтому хотелось бы начать анализ с этого факта. По данным Большой Российской энциклопедии², она составляет 1.36 млн км², по данным³ — 1.380 млн км², а по другим источникам⁴, тоже официальным, направленным на регулирование водохозяйственной сферы в бассейне — 1.459 млн км². В большинстве гидрологических изданий фигурирует первое число — 1.36 млн км². Это около 65% Европейской территории России. Волга является еще и крупной речной транспортной системой и соединена с Балтийским морем Волго-Балтийским водным путем, с Белым морем — Северодвинской системой и Беломорско-Балтийским каналом и др.

Непосредственно на Валдайской возвышенности Волга берет начало на высоте 229 м БС у д. Волговерховье Осташковского района Тверской области. В своих истоках река протекает через озера Малое и Большое Верхиты, затем через систему более крупных озер Стерж, Вселуг, Пено и Волго, объединенных в Верхневолжское водохранилище. При площади самой Валдайской возвышенности около 80 тыс. км² доля площади ее “Волжского (Каспийского) склона” в отличие от “Балтийского склона” невелика — 15–20%, хотя за счет того, что большинство водотоков и озер-водохранилищ возвышенности соединено между собой (как в Новгородской, так и в Тверской областях), отнесение некоторых из них к тому или иному бассейну условно. Например, оз. Велье из которого вытекает на запад р. Явонь, соединено

каналом с западным притоком оз. Шлино (Вельевский канал), вследствие чего образуется замкнутый водный круг: оз. Ильмень—р. Пола—р. Явонь—оз. Велье—Вельевский канал—оз. Шлино—р. Шлина—р. Цна—р. Мста—оз. Ильмень. Но р. Цна соединена Вышневолоцким каналом с р. Тверцой, принадлежащей бассейну Каспийского моря. Да и на р. Либья, вытекающей из оз. Велье, стоит плотина Мосводоканала, которая напрямую регулирует сток в Верхневолжскую и Москворецкую системы (рис. 2).

Кроме того, площадь бассейна самого Верхневолжского водохранилища (206.5 м БС, а в половодье с вероятностью превышения 0.1% 207.5 м БС), объединяющего систему водотоков и озер истоков Волги — всего 3330 км², оз. Селигер (205 м БС) — 2275 км², оз. Велье (212 м БС) — 292 км², а р. Жукопы, впадающей в Волгу между озерами Пено и Волго, 1340 км². Притоки Волга начинает принимать сразу за бейшлотом: первый из них — р. Селижаровка, которая вытекает из оз. Селигер, затем идут рр. Вазуза и Тверца. С последней начинается уже Вышневолоцкая водная система. Среднегодовой расход воды у Верхневолжского бейшлота — всего 29 м³/с, у Твери — 182, а у Ярославля — уже 1110 м³/с. Наш интерес ограничивается только истоками в границах Валдайской возвышенности.

Искусственному зарегулированию верховьев рек возвышенности (пример оз. Велье, оз. Валдайское, озер Верхневолжского водохранилища и др.) и соединению их каналами (копками) способствовал своеобразный рельеф Валдая. Как отмечали еще первые исследователи (Молчанов, 1933), на Главном водоразделе прослеживается террасовое строение поверхности, которое выявляется на цифровой модели рельефа водораздела и на крупномасштабных картах (рис. 3). Речь идет о 4–5-, 8–11-, 13–14-ти и даже 16–24-метровых террасах, находящихся на береговых склонах озер. Для склонов Валдайских озер они свидетельствуют об этапах их регрессии в голоцене.

В целом на Валдае повышение высот расположения озер идет в меридиональном направлении от Валдайского озера (192 м БС) до группы озер, расположенных к юго-западу до высот около 235 м БС, далее понижается до 191.3 м (оз. Русское), поднимается до оз. Велье (207 м БС) и оз. Пестово (229 м БС). Между оз. Велье и оз. Селигер (205 м БС) расположено оз. Глухое (около 237 м БС) на север от Полновского плеса оз. Селигер (Молчанов, 1933).

По-видимому, абсолютные высоты озер на западе и востоке могут быть соединены в отдельные группы по средним показателям, убывающим с запада на восток на определенную величину, — на западе шаг изменений — 8–10 м, а на востоке — 4–5 м, что говорит о возможном сходстве генезиса

² <https://bigenc.ru/c/volga-9bf6d0> (дата обращения 02.03.2023).

³ <https://matfaq.ru/question/otsenka-rechnoy-sistemy-i-basseyna-reki-volga/> (дата обращения 02.03.2023).

⁴ <http://npncvp.ru/volga/Volga.pdf> (дата обращения 02.03.2023).

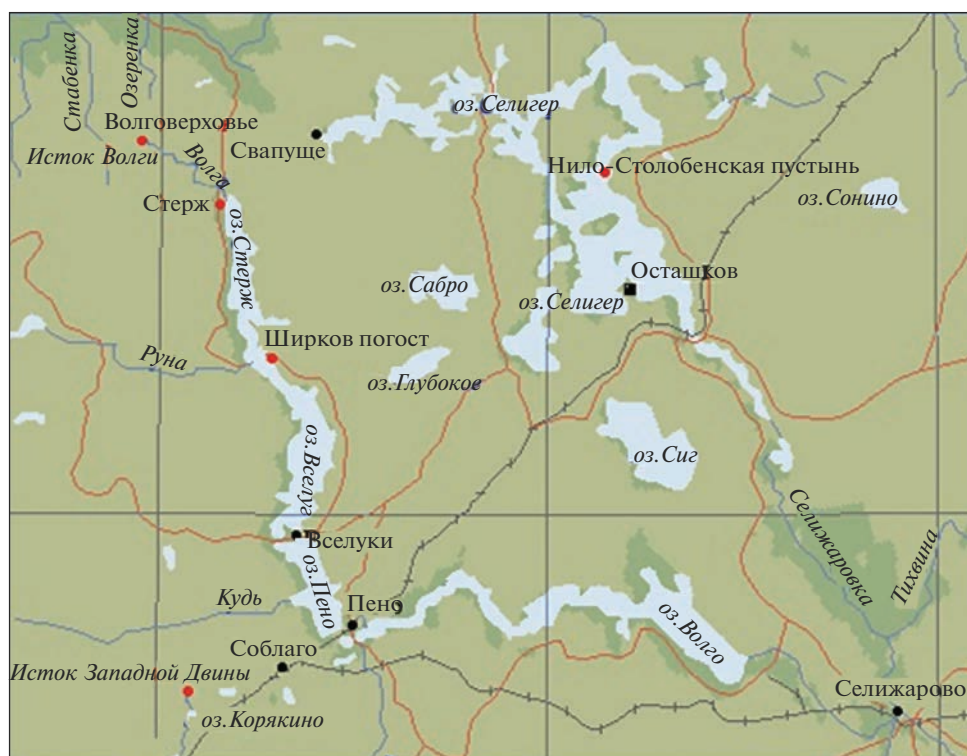


Рис. 2. Истоки Волги.

озер по мере дегляциации и формирования конечно-моренного комплекса Валдая.

В истоках Волги имеется и ряд “сквозных долин” на разных уровнях, например, долина р. Либья, впадающей в оз. Шлино и соединенной в своем верховье каналом с оз. Велье. Севернее и южнее канала расположены наивысшие точки рельефа, составляющие водораздел для ручьев и рек, текущих на восток. Высоты от оз. Шлино растут к югу и становятся частью южного водораздела р. Шлины и притоков речного бассейна верховьев Волги.

Новая методология исследований таких геоморфологических систем, как Валдайская возвышенность, и их ландшафтов определяется нами как “биофизика ландшафта” (Тишков, 2022). Она охватывает весь спектр знаний о средообразующих свойствах биоты и определяемых ею новых “биогенных” качествах ландшафта — тепловых (наведенные биотой “тепловые поля”, трансформация температуры, ее изменчивость в пространстве и пр.), световых (альbedo, освещенность поверхности для развития биоты, различия в светолубии растений и пр.), гидрологических (трансформация осадков, поглощение и удержание воды биотой и почвой, транспирация, интенсивность водообмена и трофность водоемов, капиллярность и др.), энергетических (продуктивность, накопление и эмис-

сия углерода, удельная плотность органического вещества, циклы и скорость оборота углерода, биогенная нагрузка на водоем и др.) и пр. С их проявлением собственно и связана “водотворная” (водосберегающая, водорегулирующая и, отчасти, ассимиляционная) способность ландшафтов Валдая, которую традиционно считают интегральным выражением особенностей местного климата (повышенное количество осадков — до 1000 мм, умеренные характеристики испарения с водной поверхности и почв), конечно-моренного рельефа, четвертичных отложений, почв, лесов, обилия озер и болот.

Эта методология смыкается с поиском инвариантных свойств отдельных компонентов ландшафта (Кренке, 2020; Пузаченко, 1983; Тишков, 1989), на современном этапе развития географических исследований она органично связана с использованием дистанционных методов, мультиспектральной съемки и цифровых моделей рельефа как каркаса для мониторинга изменчивости биотических и биофизических параметров ландшафта (Пузаченко и др., 2002, 2019). С позиций биофизики ландшафта можно ответить и на вопрос о роли собственно рельефа в формировании экосистем аккумулятивного и транзитно-аккумулятивного типа, выполняющих водосберегающую, водорегулирующую и ассимиляционную функции. В своем функционировании они ори-

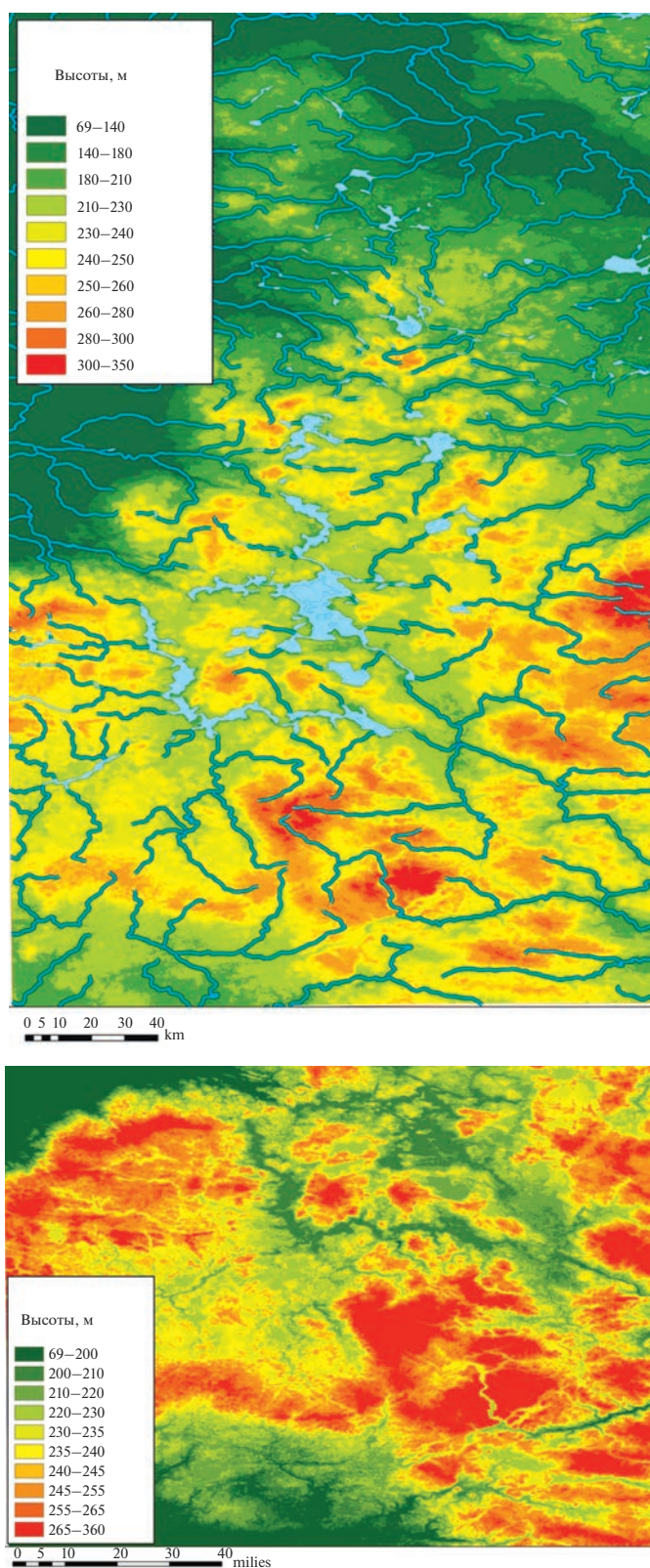


Рис. 3. Цифровая модель Валдайской возвышенности (верх) и истоков Волги (низ). Интервалы высот выделены экспертно автором.

ентированы на накопление “избытков” биогенных вещества и энергии и включения их в литогенез (осадконакопление), а значит и в эволюционные преобразования рельефа.

Выделение в нашем случае уровней представления относительно целостных геоморфологических систем (Валдайская возвышенность, поозерье водораздела, водосбор истоков Волги) важно в методологическом плане для понимания механизмов формирования гидрологических свойств ландшафта, их возможных изменений в процессе его эволюции.

Количественные данные о реках и других водоемах рассматриваемого района исследований получены из некоторых научно-справочных изданий (Валдайские ..., 2021; Малые ..., 1998; Основные ..., 2015⁵), электронного каталога “Озера России”⁶, списка озер национального парка Валдайский (Недогарко и др., 2010). Для оценки объемов экосистемных услуг использованы методы, рекомендуемые Всемирным банком, Институтом мировых ресурсов и другими изданиями (Экономика ..., 2002; Экосистемные ..., 2016; и др.).

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ВОЛГИ НА ВАЛДАЙСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Иногда ее называют “Валдайское плоскогорье” или “Валдайские горы” (Алаунские горы), границы которых совпадают с областью распространения конечно-моренных отложений Валдайского оледенения.

Она включает Тихвинскую и Мегорскую гряды, Вепсовскую возвышенность и др. На северо-западе граничит с Приильменской, на юго-востоке — с Верхневолжской низменностью, а на юге — со Смоленско-Московской возвышенностью. На юго-востоке возвышенности проходит граница Осташковского оледенения. Коренные породы представлены каменноугольными известняками, мергелями и глинами. Они перекрыты ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями. Именно валунные суглинки и супеси, флювиогляциальные пески и глины являются здесь почвообразующими породами. Рельеф моренный, холмисто-грядовый, озерно-холмистый. Характерна относительно высокая заболоченность — до 9–19% территории, повсеместно представлены болотные массивы площадью 15–20 га с мощностью торфа от 1 до 9 м. Практически все болота региона имели “озерный” старт развития. Здесь развит карст,

как глубинный, так и поверхностный (воронки, ложбины, долины, подземные реки и “пульсирующие” озера).

На возвышенности много озер, в том числе крупных — Пено, Вселуг, Волго, Селигер, Велье, Пирос, Боровно, Валдайское и др. Наибольшие высоты — 346.9 м БС, “Макушка Валдая” (холм в верховьях р. Цна), а также горы Ореховая возле оз. Селигер (288 м БС) и Рыжуха (296 м БС).

Интегральными показателями эволюции и функционирования ландшафтов Валдайской возвышенности можно считать два разнонаправленных процесса — сток рек и озер и аккумуляция в них сапропеля, которая меняет не только конфигурацию и профиль водоема (котловины, русла), но и объем стока, а у озер-водохранилищ — полезный и мертвый объемы.

Первый вектор — по данным (Гуревич, 2020; Многолетние ..., 2021), на Валдае рост годовых сумм осадков происходит с 1980 г. За период наблюдений после 1980 г. средняя многолетняя сумма осадков выросла на 114 мм (с 675 до 789 мм). Максимальные значения годовых осадков увеличились с 891 (1953 г.) до 1016 мм (2004 г.). Наибольшее увеличение осадков отмечено в январе — 29 мм, декабре и августе — 23 мм в каждый месяц. В другие сезоны положительный тренд осадков менее значителен. Отрицательные тенденции наблюдаются в апреле и сентябре (материалы ВФ ГГИ).

В соответствии с ростом количества осадков годовой сток на малых реках, формирующих сток верховий Волги и первичной гидрографической сети, также показывает рост, начиная с 1980–1990-х, а в логах (сток в озера) — с 1990-х годов. Возможно, что из-за участвовавших оттепелей зимний минимальный сток на реках Валдая показывает более интенсивное и однородное (зависит от площади водосбора) увеличение, что сказывается на многолетнем снижении максимальных расходов воды за половодье. Многолетняя цикличность водности зимней межени не проявляется. Наблюдается общее повышение зимнего межени стока за весь период наблюдений. Отмечается и выраженная тенденция повышения минимальных 30-дневных расходов воды в зимний период (Лавров, Калужный, 2016).

Выявляются тренды и в отношении уровня грунтовых вод. По наблюдениям в скважине № 12 (Валдай, Таежный лог), уровни воды неравномерно понижались с 1950-х годов к 1969 г. С 1973 г. уровень в скважине повысился в среднем на 50 см (Гуревич, 2020).

В регионе отмечается и рост испарения с водной поверхности (Валдайские ..., 2021; Гуревич, 2020), вызванный ростом температуры воздуха, однако он частично компенсируется ростом облачности и уменьшением потока радиации. Способный влиять на сток рек Валдая рост испарения

⁵ Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги. Научно-прикладной справочник. Ливны: Издатель Мухаметов Г.В., 2015. <http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/verhvolga.pdf> (дата обращения 03.02.2023).

⁶ <http://wp.limno.org.ru/win/flake.php> (дата обращения 03.02.2023).

на суше не проявляется из-за высокой теплоемкости местных почв, которая препятствует их нагреванию и тем самым снижает величину испарения. А вот при понижении температуры воздуха, наоборот, высокая теплоемкость почвы повышает величину испарения (Гуревич, 2020; Многолетние ..., 2021).

Помимо опосредованного влияния на зимний сток гидрофизических процессов существенный вклад в величину стока вносят зимние оттепели, количество и продолжительность которых растет с повышением температуры воздуха. Во время оттепелей происходит снеготаяние и водоотдача из снежного покрова, формируется поверхностный сток. Наблюдаются фазовые переходы влаги в мерзлом слое и его оттаивание, пополнение запасов грунтовых вод.

Несмотря на существенную роль оттепелей и увлажнения в формировании зимнего стока в последнее время, их вклад в рост его величины в январе–феврале может составлять до 50% от общего роста среднего зимнего стока за последние десятилетия. Как отмечено выше, в последние десятилетия наблюдается рост осадков в течение всего климатического года. Рост осадков однозначно приводит к росту инфильтрационной составляющей потока влаги как в зимне-весенний, так и летне-осенний периоды. Он приводит и к росту влажности почвы и увеличению испарения.

Второй вектор — осадконакопление в озерах Валдая. Здесь голоценовые отложения глинистого сапропеля (до 30% органики), известковистого сапропеля (до 50% органики), диатомового и диатомово-глинистого сапропеля (более 50% органики) в отдельных озерах достигают существенных мощностей, способных оказывать влияние и на сток, и на прогнозируемую эволюцию озерных систем Валдая (Молчанов, 1933; Валдайские ..., 2021). В целом, интенсивность накопления озерных осадков возвышенности усилилась с момента старта аграрного освоения территории Валдая (Субетто, 2009; Tishkov et al., 2021). В некоторых озерах их мощность может составлять, например, до 12 м (оз. Старосельское) и до 7 м в Усадьевской луке Валдайского озера (Валдайские ..., 2021) и др.

Реки, берущие начало на Валдайской возвышенности (Волга, Западная Двина, Днепр, Ловать, Мста, Пола, Сясь, Молога, Тверца, Полометь и многие другие), через Верхневолжскую, Вышневолоцкую, а затем и Невско-Ладожскую водные системы обеспечивают водой оба столичных мегаполиса России. А если взять совокупно население бассейнов Волги, Днепра и Западной Двины, то можно говорить о почти 50% населения России, которое получает исходно чистую, не требующую глубокой очистки, фактически питьевую воду.

ВАЛДАЙСКОЕ ПООЗЕРЬЕ ВОЛЖСКОГО СКЛОНА ГЛАВНОГО ВОДОРАЗДЕЛА

Если целостность Валдайской возвышенности определяется спецификой конечно-моренного рельефа и его гляциальным генезисом, то в случае с Валдайским поозерьем геоморфологическая система детерминирована и поверхностными водами — озерами и реками, связанными между собой, в том числе за счет тысячелетней практики регулирования уровня воды в озерах и стока рек. Как и все остальные поозерья вдоль “Балтийской дуги” конечно-моренных ландшафтов (Макленбургское, Мазурское, Полесское, Псковское и др.), Валдай имеет сложный генезис. Здесь моренные, конечно-моренные отложения и продукты их флювиогляциальной трансформации перекрывают эродированную дочетвертичную поверхность с глубокими врезами погребенных и местами наследуемых современными реками и ручьями долин. На формирование каркаса, определяющего гидрологические особенности района последнего оледенения, влияние оказывали колебания уровня Привалдайского ледникового озера, часть вод которого при высоких уровнях перетекала на восточный и другие склоны возвышенности и периодически создавала эффект “бифуркации” для водно-ледниковых потоков над котловинами озер, в том числе и современного Валдайского озера (современный уровень 192–193 м БС, бассейн Балтийского моря), начиная с отметок 210 м БС на запад и 215 м БС на северо-запад, т.е. исходно было возможно и его перетекание в истоки Волги и в оз. Ильмень. Постепенное вытаивание моренного льда увеличивало проницаемость этих отложений, создавая в прошлом дренажную сеть, напоминающую карстовую. Стабилизация (выполаживание) происходила под влиянием в качестве базиса эрозии квазистационарных уровней приледниковых озер. Значительные колебания уровня озер Валдая в течение голоцена отмечаются многими авторами (Арсланов и др., 1992; Субетто, 2009). Например, данные диатомового и споро-пыльцевого анализов говорят о падении уровня валдайских озер в бореальный период и первую фазу атлантического периода на 10 м по сравнению с современным (Валдайские ..., 2021; Субетто, 2009; Tishkov et al., 2023), а в субатлантический — на 4 м. Стабилизация уровня озер, сравнительно быстрый переход уровня на новое квазистационарное положение подтверждает ступенчатый характер климатических и геоморфологических процессов в регионе, за исключением, возможно, оз. Селигер, уровень которого постепенно рос в голоцене (Konstantinov et al., 2021).

Котловины многих озер Валдая могут быть отнесены к смешанному аккумулятивно-просадочному типу. В период последнего оледенения озера существовали в виде мертвого льда. Затем, при

потеплении, лед вытаял, оставленный на льду материал был частично вынесен за пределы нынешнего водосбора озер, а частично лег на дно озерных котловин. По-видимому, можно говорить о одновременной и, в целом, поздней расконсервации ледниковых котловин в процессе термокарста. Время образования озер на Валдае растягивается со среднего дриаса [сапропель на дне болота Ольгино в районе оз. Ужин — 14200 ± 430 кал. л. н. (Tishkov et al., 2023), оз. Нарочь — 13110 ± 70 кал. л. н.], до пребореала и бореала [оз. Кривое, торф — 10280 ± 11 кал. л. н. (Валдайские ..., 2021)]. Вода этих озер покрывала и современные котловины валдайских озер. Например, в пределах центральной части национального парка Валдайский сравнительно обширная поверхность на высоте 205–207 м БС (современный уровень оз. Велье) заливалась озерными водами в послеледниковье, а отложения тонких озерных глин (звонцовых глин) встречаются повсеместно и в самих современных котловинах озер, и на суше. В растительном покрове их присутствие индицируется распространением сохранившихся от распахки фрагментов широколиственных лесов. Например, звонцовые глины встречаются у д. Соколово на высоте 198 м. Эти территории и акватории попадают в зону флювиогляциальной и озерно-ледниковой аккумуляции и во многом определяют характер природной, а в связи с избирательным характером аграрного освоения и антропогенной мозаики ландшафта Валдайского поозерья (Белоновская и др., 2016).

Главная особенность ландшафтов поозерья заключается в обилии водных объектов. Например, на территории национального парка Валдайский 257 озер — 164.6 км^2 , или более 10% площади (Валдайские ..., 2021). Их средние размеры лежат в интервале от 0.01 до 43 км^2 . Некоторые из них уже в историческое время исчезли, оказались практически полностью заболоченными, покрылись сплавиной (например, оз. Лебевец). На Балтийском склоне Валдайской возвышенности расположено 220 озер, на Волжском — всего 37 озер с общими площадями 84.4 и 80.2 км^2 соответственно, т.е., различаясь в 6 раз по количеству озер, склоны водораздела почти уравниваются по их суммарной площади. Урезы озер — в интервале высот 149–251 м БС на Балтийском склоне и в интервале 201–232 м БС на Волжском склоне Валдайской возвышенности. Каталог озер национального парка Валдайский представлен в (Недогарко и др., 2010).

Большинство местных рек и озер по своей величине и площади водосбора относятся к категории малых и очень малых. Из-за этого и из-за неустойчивости водного режима озера обладают повышенной чувствительностью к любому антропогенному воздействию (заиливанию за счет смыва с аг-

рарных угодий, зарастанию макрофитами при эвтрофировании, образованию сплавин и пр.).

На Волжском склоне расположена зона активного формирования поверхностного и подземного стока, от количественного и качественного состава которого зависит водность Верхней Волги. За долгий период аграрного освоения территории многие озера испытывали влияние эвтрофикации, заболачивания, регулирования стока, строительства копок, перемычек, каналов, изменения берегов, отделения заливов и пр. В последние десятилетия эвтрофирование озер и поступление в них твердого стока замедлились в результате прекращения распахки аграрных угодий и использования удобрений при заповедывании значительных территорий поозерья (Валдайские ..., 2021).

Если сама Валдайская возвышенность формировалась в течение нескольких ледниковых стадий, то для современного этапа развития Валдайского поозерья характерно наличие большого числа озер гляциально-ложбинного и гляцио-депрессионного типов. Первые, более глубокие, расположены в древних ложбинах стока, переработанных ледником. Вторые, как правило, мелководные, в пониженных участках рельефа. Они вписываются в холмисто-моренный ледниковый рельеф, в котором присутствует практически весь спектр аккумулятивных и аккумулятивно-денудационных форм ледниковой морфоскульптуры (валы и гряды конечных морен, камы, озы, конусы выноса и т.д.). Высота холмов и гряд составляет 20–60 м. Средняя высота над уровнем моря 150–250 м БС.

Рельеф поозерья отличается высокой уязвимостью из-за преобладания здесь легко размываемых водно-ледниковых отложений при существенной крутизне склонов (15° – 20°) и обильных атмосферных осадках (свыше 800 мм в год). Именно распространение здесь эрозионных форм рельефа, связанных с относительно древними и современными масштабными рубками лесов [например, лесистость Валдайского района в начале XX в. составляла только 24% (Валдайские ..., 2021)] и прошлой аграрной деятельностью, послужило отправной точкой для высказывания гипотезы о наследовании древней агрогенной фрагментации ландшафта в современном ландшафте (Белоновская и др., 2014, 2022; Тишков, 1994).

Разнообразие форм рельефа и почвообразующих пород предопределили чрезвычайную пестроту и сложность почвенного покрова. Почвы, среди которых преобладают дерново-слабоподзолистые (палевоподзолистые), обогащены минералами (полевые шпат, слюды, биотит и др.) и имеют остаточную карбонатность. В понижениях между холмами распространены дерново-подзолисто-глеевые почвы. Торфяно-болотные почвы занимают небольшую площадь вследствие хоро-

шей дренированности территории. Под хвойно-широколиственными и широколиственными лесами формировались буро-псевдоподзолистые почвы. Почти на всех относительно ровных или имеющих слабый уклон поверхностях в почвах отчетливо прослеживается плужный след, а в нижней трети и у основания моренных холмов, а также по берегам озер и рек отмечаются полосы намывных почв на переотложенных наносах. Судя по мощности сапропеля в заливах некоторых озер, твердый сток с пашни в отдельные периоды достигал высокой интенсивности — до 0.25 т/га в год и выше, а на голоценовой кривой объемной плотности сапропеля некоторых озер Валдая отмечается ее рост как раз с момента старта аграрного освоения склонов (Арсланов и др., 1992; Недогарко, 2007; Субетто, 2003; Tishkov et al., 2021).

К факторам, определяющим природную мозаику ландшафта, следует отнести экотонный характер его растительности — поозерье находится на границе подзон южной тайги и хвойно-широколиственных лесов. В нем относительно полно представлено многообразие производных лесов, сформировавшихся на месте южной тайги, хвойно-широколиственных и широколиственных лесов восточноевропейского типа. Они занимают до 70–80% территории.

Антропогенные факторы структуры и мозаичности современного ландшафта Валдайского поозерья и стока Волги распространялись и на водную систему — озера и реки. В разные периоды многие из них оказались искусственно зарегулированными. Именно зарегулированность уровня озер, вхождение их в каскадные группировки является характерной особенностью Валдая. Под каскадной группировкой понимается гидрографическая сеть группы озер, расположенных на разных уровнях в пределах водосборного бассейна одного озера, завершающего группировку. Включенные в каскад озера становятся зонами аккумуляции, участвующими в удержании взвешенного минерального и органического материала. Они по своей гидрологической сути — замыкающие водохранилища. Для Валдайского поозерья такая ситуация имеет тысячелетнюю историю. Следы дамб на мелких водотоках, устройство плотин, мельничных прудов, копки, каналы, каналы и пр. встречается повсеместно. Они использовались в разные периоды как транспортные системы, для поддержки лесосплава, навигации, в XX в. для малой энергетики и водоснабжения. Группировка озер-водохранилищ Боровновской ГЭС замыкается плотиной со сбросом воды по деривационной схеме. В эту группировку следует включать озера Островенко и Плотищенко — уровень первого был искусственно понижен устройством канала в оз. Плотищенко. Для его стока расширен канал от р. Шегринки в оз. Боровно. В этой группировке 13 озер. Она замыкается Горнешин-

ской плотиной на р. Боровне и включает 29 озер. Группировка озер бассейна Валдайского озера-водохранилища замыкается бейшлотом в истоке р. Валдайки. В этой группировке 20 озер. Группировка оз. Ельчинского (всего 10 озер) замыкается плотиной в истоке р. Гремячей, на которой до 1960-х годов располагалась Ельчинская ГЭС. Группировка р. Чернушки (впадающей в р. Валдайку) до устья включает 33 озера, в том числе малые озера с наиболее высокими отметками урезом. Группировка оз. Русского состоит из 10 озер верхней части бассейна р. Полометь. Группировка Вельевского водохранилища замыкается плотиной в истоке р. Либья, через которую вода сбрасывается на Волжский склон (всего 25 озер). Наконец, каскад Полновского плеса оз. Селигер (незамкнутый) включает 6 озер. Последние два каскада имеют отношение к истокам Волги.

На пространственном уровне Валдайского поозерья в иерархии рассматриваемых геоморфологических систем можно оценивать и масштабы антропогенной трансформации бассейнов валдайских озер. Общий вывод — практически все площади лесов здесь за последние 2000–2500 тыс. лет претерпели неоднократное уничтожение в рамках подсечно-огневого земледелия и расчисток под пашню, углежжения и заготовок поташа для производства стекла, сплошных рубок и пожаров. Судя по данным спорово-пыльцевого анализа (Климанов и др., 2010; Tishkov et al., 2021, 2023) и датировкам некоторых археологических памятников (Зайцев, 2009; Седов, 2005), расчистки леса в районе Валдайского поозерья имели место ранее массового переселения славян в начале–середине I в. н.э. (железный век). На этом рубеже наметился резкий тренд снижения доли пыльцы ели (*Picea abies*), дуба (*Quercus robur*), орешника (*Corylus ovelana*) и рост участия в составе растительного покрова сосны (*Pinus sylvestris*), злаков, осок и зеленых мхов (в основном, по-видимому, обильно продуцирующих споры, пиропитов — pp. *Funaria*, *Bryum*, *Polytrichum*). Можно предположить, что именно в этот период Валдай стал ареной расселения славянских и славяно-балтских (и прусских) народов, успешно осваивавших под пашню хвойно-широколиственные и широколиственные леса конечно-моренного ландшафта вдоль “Балтийской дуги” конечно-моренных ландшафтов от Средней Вислы и Мазурских озер (на севере нынешней Польши) до Валдая (Седов, 2005). К периоду III–IV вв. н.э. (“Римскому климатическому оптимуму”) были приурочены эти переломные для лесной растительности и озер Валдая события, когда начал формироваться лесо-поле-луговой агроландшафт и стартовало накопление агрогенных илов в озерах (Tishkov et al., 2021, 2023).

Последнее отразилось и на системе местной топонимики — в ней преобладают названия, в ос-

нове которых слова “бор” и “гора”, отражающие широкое распространение здесь лесных расчисток. Вторым важным для состояния лесной растительности и характера ее антропогенной мозаики стал период освоения сложившегося в процессе интенсивного подсечно-огневого земледелия агроландшафта новгородскими словенами. Они не только преемственно восприняли уже измененный лесной покров Валдая, но и существенно расширили границы его освоения, внося в естественную мозаику конечно-моренного ландшафта антропогенную составляющую. Она складывалась в период VIII–XII вв., когда отмечались благоприятные климатические условия (более теплые и влажные относительно современных), а количество поселений превосходило даже количество современных деревень и сел. По-видимому, и в более поздние периоды, например в XIV–XV и XVII–XIX вв., характер аграрного освоения отличался сравнительно высокой интенсивностью, что приводило к сокращению площади коренных лесов, замещению их вторичными, в основном сосновыми и березовыми лесами, а также к преобладанию в ландшафте безлесных земель. Так, по нашим оценкам, в отдельные периоды лесистость Валдайского поозерья составляла менее 40%. Это нашло отражение на некоторых старых планах и картах, например на карте Генерального плана Валдайского уезда 1788 г., владений Иверского монастыря (Тишков, 1994), а на карте России 1853 г. леса вокруг озер Валдайское и Ужин фактически отсутствуют (Белоновская и др., 2014; Недогарко, 2007).

Подсечно-огневой способ расчистки в районе валдайских озер, возникнув более 2000 л. н., сохранялся до 1930-х годов. В районе преобладал сележно-озерный и возвышенно-озерный типы поселений. И в том, и в другом случае приусадебное хозяйство ориентировалось на особенности рельефа и определяемый ими микроклимат: при береговом размещении поселений — на отепляющее влияние озера (исключение раннеосенних заморозков), а при размещении на возвышенных участках — на снижение риска поздневесенних заморозков.

Заканчивая рассмотрение Валдайского поозерья, отметим, что на данном пространственном уровне анализа геоморфологическая детерминированность эволюции ландшафта сменяется гидрологической детерминированностью, которая особо проявляется, когда человек регулирует уровень и сток озер, объединяя их в каскады. Кроме того, именно поозерье определило во многом границы первичного аграрного освоения территории, массового сведения лесов и в итоге — формирование здесь древнерусского лесо-поле-лугового ландшафта. Его существование во многом предопределило следующую — биотическую фазу развития водоемов в истоках Волги за счет при-



Рис. 4. Национальный парк Валдайский как часть водосбора Волги.

озерной локализации поселений, накопления донных отложений, развития макрофитов и в конечном итоге эвтрофирования водоемов.

В заключение раздела отметим возможную роль подземных вод в стоке Верхней Волги. В истоках располагается Надвалдайский водоносный горизонт с такими водовмещающими породами, как тонко-, мелко- и среднезернистые пески с галькой и гравием и суглинки (мощность до 10–12 м, иногда до 20 м в районе Осташкова). Воды в основном безнапорные, вскрываются на глубине до 9 м. Питание горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, реже — вследствие поступления вод из нижележащих горизонтов. Водообильность горизонта около 0.5 л/с/км². Подземный сток в Верхневолжском гидрогеологическом районе формируется именно в пределах Валдайской возвышенности. Пресные воды здесь приурочены к закарстованным известнякам и доломитам девонского и каменноугольного возраста, залегающим близко к поверхности под относительно маломощными четвертичными и верхнемеловыми отложениями. Максимальная величина подземного стока наблюдается в центральных частях Валдайской возвышенности, собственно, в верховьях Волги [модуль подземного стока составляет порядка 2.5–3 л/с/км² (Гуревич, 2020)].

МЕСТО ВОДОСБЕРЕГАЮЩИХ И ВОДОРЕГУЛИРУЮЩИХ УСЛУГ ЛАНДШАФТОВ ИСТОКОВ ВОЛГИ НА ВАЛДАЙСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Наши наблюдения и данные мониторинга ВФ ГГИ показывают, что происходит трансформация стока Верхней Волги под влиянием климатических изменений и хозяйственной деятельности на водосборах. В Тверской и Новгородской областях создана сеть региональных ООПТ, в том числе в истоках Волги. Только в Тверской области функционирует Центрально-лесной биосферный заповедник и национальный парк “Завидово”, 574 региональных заказников и 417 памятников природы. Государственный природный заказник “Исток реки Волги” организован еще в 1972 г. на площади 7421 га. Часть водосбора верховьев Волги охраняется в национальном парке Валдайский (158 500 га) с охранной зоной 88 409 га (рис. 4), в государственном природном биосферном Центрально-лесном заповеднике (24 173 га) с охранной зоной 46 061 га и на территории Лечебно-оздоровительной местности и курорта “Селигер” (378 893,1 га).

Интегрально оценить роль Валдайской возвышенности как “колыбели Волги” можно через оценку объемов стока реки (на бейшлоте Верхневолжского водохранилища), а лучше с учетом суммарного эффекта роли Волжского склона возвышенности у Твери (182 м³/с). Но вполне логично было бы такую оценку дать в рамках определения водосберегающей и водорегулирующей роли ландшафтов Валдая в объеме их экосистемных услуг. Тем более что они взаимосвязаны и дополняют друг друга, а некоторые (например, рекреационные услуги) напрямую связаны с водорегулирующими, водосберегающими и ассимиляционными функциями Валдайской возвышенности. При этом нами принимается, что природоохранный и водоохранный статус истоков Волги сохраняется и сохранится в дальнейшем. Особенно важно сохранить леса, озера и болота возвышенности, собственно и обеспечивающие сток рек, в том числе Волги. В табл. 1 приведена денежная оценка экосистемных услуг ландшафтов истоков Волги в соответствии с рекомендациями Европейской экономической комиссии ООН и других изданий (Европейская ..., 2007; Экономика ..., 2002; Экосистемные ..., 2016).

Отметим, что полученные значения монетарной оценки удельных величин экосистемных услуг природного комплекса водосборов истоков Волги — 2275–5050 руб. на 1 га в год и суммарный эффект их существования на Валдайской возвышенности до 1,8–4,0 млрд руб. в год — ниже ожидаемых. Их удельное выражение несколько отличное от тех, что представил в свое время Р. Констанза (Constanza et al., 1997) для бореаль-

ных лесов планеты, ориентируясь на удельные показатели для ООПТ США. Среди последних, например, определяющие объемы дают рекреационные услуги (Йеллоустонский национальный парк посещает не менее 2 млн туристов в год). На Валдайской возвышенности в объеме экосистемных услуг приоритетно доминируют водо- и климаторегулирующие функции, дающие до 1/3 денежной оценки каждая. Прогноз сохранения этих показателей вполне позитивный, несмотря на трансформацию (уменьшение) стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги в целом в связи с изменениями климата в последние десятилетия (Горбатенко и др., 2021). Очевиден и рост посещаемости ООПТ, который обеспечит увеличение рекреационной ценности ландшафтов и альтернативный вектор их хозяйственного использования и экономического развития региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использованная методология и методы анализа и синтеза материалов, среди которых важное значение имеют материалы мониторинговых наблюдений ВФ ГГИ, позволили на разных пространственных уровнях — от ареала всей возвышенности, полосы Валдайского поозерья вдоль Главного водораздела Балтийского и Каспийского морей к отдельным водосборам и водоемам — проследить условия формирования стока Волги, вклада в него изменчивого климата, эволюционирующего рельефа, системы водоемов с зарегулированным стоком, грунтовых вод и др.

На пространственном уровне Валдайского поозерья (системы водосборов вдоль водораздела) при анализе выявляется, что геоморфологическая детерминированность ранней эволюции ландшафта (когда сток приоритетно определяется рельефом) сменяется гидрологической детерминированностью. Она особо проявляется, когда природа, а затем и человек регулируют и стабилизируют уровень и сток озер и рек, объединяя их между собой. Кроме того, именно благоприятные условия поозерья определили во многом границы первичного аграрного освоения территории, массового сведения лесов и в итоге формирование здесь древнерусского лесополе-лугового ландшафта. Существование его с активными склоновыми процессами, интенсификацией смыва почв на склонах во многом предопределило следующую биотическую детерминированность в развитии (эволюции) водоемов в истоках Волги за счет приозерной и приречной локализации поселений, накопления донных отложений, развития макрофитов и в конечном итоге приводит к эвтрофированию водоемов.

Таблица 1. Денежная оценка экосистемных услуг ландшафтов истоков Волги

Экосистемные услуги	Методы оценки	Удельная величина, руб. на 1 га в год
Водотворная (водорегулирующая, водосберегающая)	Удельные показатели стока с 1 га в год [при средней цене за 1000 м ³ в 2023 г. 226 руб.; оценки через снижения потерь стока при обезлесивании и осушке болот (затраты на компенсацию – лесовосстановление и восстановление водного режима на осушенных землях)]; возможные платежи за обеспечение устойчивого стока воды 1 класса “условно чистая” от потребителей ниже по течению	650–1500
Климаторегулирующая, стабилизация состава атмосферы (CO ₂ и др.)	Денежная оценка возможных потерь “урожая на корню” за счет действия климатических факторов (недостаток и избыток тепла и влаги), “недобор” прироста древесины в аномальные по климатическим условиям периоды. Оценка объемов депонирования углерода с учетом возможной стоимости 1 т фиксируемого углерода (от 5 до 55 евро за 1 т): “растущие” леса Валдая на залежах до 1.5–2.0 тС/га в год, болота 0.6 т/га в год ; или через удельную оценочную стоимость поглощения двуокиси углерода управляемыми лесами (ООПТ) – около 2000 руб./га в год	950–2000
Почвозащитная	Расчет затрат на работы по защите склонов от эрозии и рекультивации нарушенных земель и предотвращение риска эрозии (0.1–2.5% от страховой суммы из расчета, что в таковом нуждается 30% территории)	150–3750
Ассимиляционная	Оценка через затраты на ликвидацию последствий загрязнения: создание геохимических “ловушек” на водоемах и водосборах, разбавление загрязненных вод до безопасного уровня и пр.; через определение издержек по достижению экологических нормативов и обеспечению их соблюдения в последующий срок и стоимость промышленной очистки (возможные расчеты и через разницу в цене воды на хозяйственные нужды и питьевой воды, не требующей доочистки)	20–40
Биопродукционная	Оценка через затраты на создание аналогичного уровня продукции (10–16 т/га в год) при стоимости 1 га по нормативам: лесные культуры – 4 тыс. руб. (фактически – 3.5 тыс. руб.), содействие – 340 руб. (фактически – 90 руб.); расчетный период – 60 лет, оптимальная лесистость – 70%	70–100
Биоресурсная	Прямая оценка через стоимость “пространственно распределенных” ресурсов (дров, ягод, грибов, заготовок сена, лекарственных трав, охотничьей фауны, продуктов рыболовства и пр.), изымаемых без последствий для природы	90–150
Сохранение биоразнообразия, в том числе генетического	Оценки через средние показатели удельных затрат на содержание национального парка Валдайский (среднее – 90–100 руб./га в год)	100–200
Оздоровительные	Расчеты через эффект снижения уровня заболеваемости и оплаты по больничным листам тех, кто выбирает отдых в средней полосе (на Валдае); принятый показатель растет по мере роста числа рекреантов на площадь парка (общепринятые нормативы для европейской части России)	5–10
Рекреационные (коммерческое использование)	Оценки с использованием среднего для национальных парков России современного дохода от рекреационной деятельности (Валдайский – в тройке национальных парков по зарабатываемым собственным средствам – около 60% бюджета)	60–120
Гедонические (некоммерческое использование, стоимость существования)	Расчеты через разницу стоимости земли и деревенских домов на территории парка и вне его, “готовность платить” у посетителей за вход, транспортные затраты и пр.	180–200
Итого – средообразующий эффект, экосистемные услуги, руб./га в год		2275–5050

Примечание. Методы оценки в (Европейская ..., 2007; Тишков, 2005; Экономика ..., 2002).

Интегральная оценка эффективности действия факторов, формирующих сток Волги на Валдайской возвышенности, показан через его абсолютные величины, а также через объем водорегулирующих и водосберегающих экосистемных услуг ландшафтов региона. Они составляют до 1/3 услуг в удельном выражении — 650—1500 руб./га в год, т.е. в 10 и более раз выше, чем государство тратит на поддержание и охрану 1 га ООПТ в год. Позитивным моментом стабилизации стока в верховьях Волги стало забрасывание сельскохозяйственных угодий на водосборах, создание здесь развитой сети ООПТ, которые сохраняют “колыбель Волги”, в том числе заказника “Истоки реки Волги”, Лечебно-оздоровительной местности и курорта “Селигер”, Центрально-лесного государственного заповедника и национального парка Валдайский. Однако рост рекреационного воздействия на водосборы истоков Волги может снизить позитивный эффект от функционирования ООПТ и обострить проблему качества воды. В связи с этим одним из приоритетных вопросов сохранения “колыбели Волги” должно стать регламентирование рекреационных нагрузок на ландшафты Валдайской возвышенности и реабилитация нарушенных ими лесных экосистем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена в рамках темы государственного задания Института географии РАН № FMGE-2024-0007 (FMGE-2019-0007).

FUNDING

The article was prepared within the framework of the topic of the State Assignment of the Institute of Geography, RAS no. FMGE-2024-0007 (FMGE-2019-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анучин Д.Н. Верхневолжские озера и верховья Западной Двины. Рекогносцировочные исследования 1894—1895 гг. / Труды Экспедиции по исследованию источников рек Европейской России. М.: Типография тов-ва И. Н. Кушнерев и К^о, 1897. 156 с.
- Арсланов Х.А., Давыдова Н.Н., Недогарко И.В., Субetto Д.А., Хомутович В.И. Развитие малых озер Валдайской возвышенности в период голоцена // История озер восточно-европейской равнины. СПб.: Наука, 1992. С. 79—93.
- Белоновская Е.А., Кренке-мл. А.Н., Тишков А.А., Царевская Н.Г. Природная и антропогенная фрагментация растительного покрова Валдайского поозерья // Изв. РАН. Сер. геогр. 2014. № 5. С. 67—82.
- Белоновская Е.А., Тишков А.А., Царевская Н.Г. Луга в системе сохранения традиционного агроландшафта национального парка Валдайский (Новгородская область) // Проблемы региональной экологии. 2016. № 4. С. 112—122.
- Белоновская Е.А., Тишков А.А., Царевская Н.Г. Разнообразие сообществ макрофитов национального парка “Валдайский” (Новгородская область) и проблемы охраны // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2018. Т. 26. № 4. С. 173—183.
- Белоновская Е.А., Виноградова В.В., Пономарев М.А., Тишков А.А., Царевская Н.Г. Оценка рекреационного потенциала национального парка “Валдайский” // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 97—111.
- Белоновская Е.А., Кренке А.Н., Тишков А.А., Царевская Н.Г., Хмельщикова И.Г. Фрагментация и разнообразие лесов национального парка “Валдайский” // Лесоведение. 2022. № 6. С. 658—673.
- Валдайские озера (Обзор результатов наблюдений за 1946—2018 гг.) / под ред. И.В. Недогарко. СПб.: РИАЛ, 2021. 242 с.
- Веденин Ю.А. Динамика территориальных рекреационных систем. М.: Наука, 1982. 190 с.
- Геоморфология и четвертичные отложения северо-запада СССР (Ленинградская, Псковская и Новгородская области). Л.: Наука. Ленингр. отд., 1969. 256 с.
- Глазов М.В. Роль животных в экосистемах еловых лесов. М.: Пасьева, 2004. 239 с.
- Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6—28.
- Гуревич А.В. Анализ и оценка многолетних изменений основных гидрометеорологических характеристик на Валдае // Гидросфера: опасные процессы и явления. 2020. Вып. 3. № 1. С. 87—104.
- Европейская экономическая комиссия ООН. Рекомендации, касающиеся платы за услуги экосистем в контексте комплексного управления водными ресурсами. Нью-Йорк, Женева: ООН, 2007. 65 с.
- Зайцев В.М. Валдай. У истоков великих рек. СПб.: ИПЦ СПГУТД, 2009. 148 с.
- Казанская Н.С., Ланина В.В., Марфенин Н.Н. Рекреационные леса. М.: Изд-во Лесная промышленность, 1977. 96 с.
- Климанов В.А., Кожаринов А.В., Тишков А.А. Палеоэкологические реконструкции динамики растительности и климата Валдайского поозерья в позднеледниковье в голоцене // Тр. нац. парка “Валдайский”. 2010. Вып. 1. С. 254—261.
- Кожаринов А.В. Динамика растительности Восточной Европы в позднем ледниковье — голоцене: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: Институт проблем экологии и эволюции РАН, 1994. 60 с.
- Кренке А.Н. Выявление инвариантных состояний агроландшафтов на основе иерархического факторного анализа дистанционной информации // Принципы экологии. 2020. № 3. С. 16—27.
- Лавров С.А., Калужный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России. 2016. № 6. С. 42—60.

- Малые реки волжского бассейна / под ред. Н.И. Алексеевского. М.: Географический ф-тет МГУ, 1998. 234 с.
- Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 202 с.
- Молчанов И.В. Озера и сапропелитовые месторождения Валдайской возвышенности // Тр. Геоморф. ин-та. 1933. Вып. 6. С. 27–45.
- Морозова О.В., Белоновская Е.А., Царевская Н.Г. Сосудистые растения национального парка Валдайский (Аннотированный список видов). М.: Изд. Комиссии РАН по сохранению биологического разнообразия, 2010. Вып. 7. 95 с.
- Недогарко И.В., Кузнецова Ю.Н., Решетников Ф.Ю. Донные отложения озер как индикатор динамических факторов // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 86–94.
- Недогарко И.В. Валдайское озеро: Научно-популярное изд. // Тверь: Твер. гос. ун-т, 2007. 52 с.
- Недогарко И.В., Кузнецова Ю.Н., Решетников Ф.Ю. Формирование системы мониторинга озер национального парка "Валдайский" / Тр. национально-го парка "Валдайский". 2010. Вып. 1. С. 114–131, 405–412.
- Нефедова Т.Г., Трейвиш А.И. Путешествие из Петербурга в Москву: 222 года спустя. Кн. 1. Два столетия Российской истории между Москвой и Санкт-Петербургом. М.: Ленанд, 2015. 240 с.
- Новенко Е.Ю. Изменения растительности и климата Центральной и Восточной Европы в позднем плейстоцене и голоцене в межледниковые и переходные этапы климатических макроциклов. М.: ГЕОС, 2016. 227 с.
- Ожегов С.И. Словарь русского языка. М.: Гос-изд-во иностр. и нац. словарей, 1953. 848 с.
- Озерова Н.А., Снытко В.А., Широкова В.А. Экспедиция для исследования истоков главных рек Европейской России (1894–1902) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 4. С. 113–128.
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-4-113-128>
- Орлов В.Н., Козловский А.И., Балакирев А.Е., Борисов Ю.М. Эндемизм хромосомных рас обыкновенной буро-зубки *Sorex araneus* L. (Insectivora, Mammalia) и возможность сохранения рефугиумов в области покровного оледенения поздневалдайской эпохи // ДАН. 2007 Т. 416. № 6. С. 841–844.
- Петрова Т.Э., Тишков А.А. Экосистемный подход к сохранению биоразнообразия на региональном и локальном уровнях // Переход к устойчивому развитию: глобальный, региональный и локальный уровни. Зарубежный опыт и проблемы России. М.: Изд-во КМК, 2002. С. 267–286.
- Покровская Т.Н., Миронова Н.Я., Шилькрот Г.С. Макрофитные озера и их эвтрофирование. М.: Наука, 1983. 153 с.
- Преображенский В.С. Теоретические основы рекреационной географии. М.: Наука, 1975. 223 с.
- Принципы и методы экономической оценки земель и живой природы. Аналитический справочник / под ред. О.А. Нестеровой и А.А. Тишкова. М.: Проект ГЭФ "Сохранение биоразнообразия", Институт экономики природопользования, 2002. 96 с.
- Пузаченко Ю.Г. Инвариантность геосистем и их компонентов // Устойчивость геосистем. М.: Наука, 1983. С. 32–41.
- Пузаченко Ю.Г., Онуфрения И.А., Алещенко Г.М. Спектральный анализ иерархической организации рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 4. С. 29–38.
- Пузаченко Ю.Г., Байбар А.С., Варлагин А.В., Кренке А.Н., Сандлерский Р.Б. Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 2. С. 51–68.
- Россолимо Л.Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.
- Седов В.В. Избранное. Славяне. Древнерусская народность. М., 2005. 670 с.
- Структура и функционирование геосистемы озера Селигер в современных условиях / отв. ред. В.П. Беляков, С.И. Шапоренко. М.: РАН, Ин-т озероведения, Ин-т географии, Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова, Ин-т геоэкологии, 2004. 552 с.
- Субетто Д.А. Озерный седиментогенез севера Европейской части России в позднем плейстоцене и голоцене: дисс. ... д-ра геогр. наук. СПб.: Институт озероведения РАН, 2003. 378 с.
- Субетто Д.А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2009. 339 с.
- Тилло А.А. Свод нивелировок рек, их падение, и каталог абсолютных высот уровней вод Европейской России // Журн. Мин-ва путей сообщения, апрель–май. Приложение. СПб., 1892. Вып. 6. 131 с. (Материалы по гипсометрии Российской Империи).
- Тишков А.А. Естественная и антропогенная динамика еловых лесов Валдая / Организация экосистем ельников южной тайги. М.: Ин-т географии АН СССР, 1979. С. 30–69.
- Тишков А.А. Фитогенные механизмы устойчивости наземных геосистем // Факторы и механизмы устойчивости геосистем. М.: Наука, 1989. С. 93–103.
- Тишков А.А. Оптимизация агроландшафта Валдая. Структура сельскохозяйственных угодий // Изв. РАН. Сер. геогр. 1994. № 3. С. 74–84.
- Тишков А.А. Биосферные функции природных экосистем России. М.: Наука, 2005. 309 с.
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Царевская Н.Г. Озера-водохранилища национального парка Валдайский и их вклад в экологическое состояние Верхне-Волжской и Невско-Ладужской водных систем / Водохранилища Российской Федерации: современные экологические проблемы, состояние, управление: сб. материалов Всерос. научно-практ. конф. (Сочи, 23–29 сентября 2019 г.). Новочеркасск: Лик, 2019. С. 8–15.
- Шапоренко С.И., Шилькрот Г.С., Тихомирова А.В., Леонов А.В. Озеро Селигер – второй исток Волги // Природа. 2002. № 6. С. 41–48.
- Шилькрот Г.С. Типологические изменения режима озер в условиях культурных ландшафтов. М.: Наука, 1979. 168 с.
- Эволюция экосистем Европы при переходе от плейстоцена к голоцену (24–8 тыс. л. н.) / отв. ред.

- А.К. Маркова, Т. ван Кольфсхоттен. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2008. 556 с.
- Экономика сохранения биоразнообразия: Справочник / под ред. А.А. Тишкова / сост. С.Н. Бобылев и др. М.: Проект ГЭФ "Сохранение биоразнообразия", Институт экономики природопользования, 2002. 604 с.
- Экосистемные услуги России. Прототип национального доклада Т. 1 Услуги наземных экосистем / ред.-сост. Е.Н. Букварёва, Д.Г. Замолотчиков. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farberk S., Grasso M., Han-non B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R., Paruelo J., Raskin R.G., Paul Suttonk P., Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital // *Nature*. 1997. Vol. 387. P. 253–260.
- Konstantinov E.A., Panin A.V., Karpukhina N.V., Bricheva S.S., Borisova O.K., Naryshkina N.N., Gurinov A.L., Zakharov A.L. The Riverine Past of Lake Seliger // *Water Res.* 2021. Vol. 48. № 5. P. 635–645.
- Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G., Novenko E.Yu., Belonovskaya E.A. Diagnostics of the Beginning of Agricultural Development of the Northwest of the East European Plain by Spore–Pollen Spectra // *Doklady Earth Sciences*. 2021. Vol. 499. № 2. P. 686–692.
- Tishkov A.A., Gracheva R.G., Konstantinov E.A., Samus A.V. The Key Section of the Valdai Peat Bog as a Source of Paleocological and Paleoclimatic Information // *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 509. № 1. P. 345–352.

Valdai Hills as the Cradle of the Volga River

A. A. Tishkov*

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: tishkov@igras.ru

The role of the Valdai Hills and the Valdai Lake area in ensuring the fullness of the sources of the Volga River and its current trends against the background of climate change is presented. It is shown that the "water-making functions" of the upland landscape are initially determined by two general properties of the relief: its invariance as a "framework of life" and its changeable evolution under the influence of endogenous and exogenous factors. The "Cradle of the Volga" in relation to the Valdai Hills and specifically the Baltic-Caspian watershed is a set of conditions that allow the formation of runoff in the upper reaches of the river. Among the main ones that determine the conservation of runoff in the average annual volume are the state of rivers, lakes, and swamps, the minimization of anthropogenic impacts (regulation of runoff, plowing, catchment, deforestation, development and pollution of the coastline, etc.), and, in general, nature protected areas (creation of them at the source of the river). Based on the materials from the monitoring of the climate and hydrological regime of the region carried out by the Valdai branch of the State Hydrological Institute (Valdai), the main trends of the Volga River runoff factors in the upper reaches have been identified. The share of water-regulating, water-saving, and assimilation functions in the total volume of ecosystem services in the landscapes of the Valdai Hills is shown. It is concluded that the modern growth of recreational impact on the catchments of the sources of the Volga River can reduce the positive effect of the functioning of nature protected areas on them. The priority issues in preserving the "cradle of the Volga" should be the regulation of recreational loads on the landscapes of the Valdai Hills, rehabilitation of disturbed forest ecosystems, and monitoring of the volume and quality of runoff.

Keywords: Valdai Hills, Valdai Lake area, Novgorod and Tver oblasts, watershed, sources of the Volga River, basin, river runoff, water-saving and water-regulating functions of the landscape, Valdai National Park

REFERENCES

- Anuchin D.N. *Verkhnevolzhskie ozera i verkhov'ya Zapadnoi Dviny. Rekognostsirovochnye issledovaniya 1894–1895 gg. (Trudy Ekspeditsii po issledovaniyu istochnikov rek Evropeiskoi Rossii)* [Upper Volga Lakes and Upper Reaches of the Western Dvina. Reconnaissance Research 1894–1895 (Proceedings of the Expedition for the Study of the Sources of the Rivers of European Russia)]. Moscow: Typolitogr. Tovar. I.N. Kushnerev i K^o, 1897. 156 p.
- Arslanov Kh.A., Davydova N.N., Nedogarko I.V., Subetto D.A., Khomutovich V.I. Development of small lakes of the Valdai Upland during the Holocene. In *Istoriya ozer Vostochno-Evropeiskoi ravniny* [History of Lakes of the East European Plain]. St. Petersburg: Nauka Publ., 1992, pp. 79–93. (In Russ.).
- Belonovskaya E.A., Krenke A.N., Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G., Khmelshchikova I.G. Fragmentation and diversity of forests of the Valdai National Park. *Lesoved.*, 2022, no. 6, pp. 658–673. (In Russ.).
- Belonovskaya E.A., Krenke A.N., Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G. Natural and anthropogenic fragmentation of the vegetation cover of the Valdai Lake area. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2014, no. 5, pp. 67–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-5-67-82>
- Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G. Diversity of macrophyte communities of the Valdai National Park (Novgorod oblast) and problems of its conservation. *Samara Luka Probl. Reg. Glob. Ekol.*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 173–183. (In Russ.).
- Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G. Meadows in the system of conservation the traditional

- agricultural landscape of the Valdai National Park (Novgorod oblast). *Probl. Reg. Ekol.*, 2016, no. 4, pp. 112–122. (In Russ.).
- Belonovskaya E.A., Vinogradova V.V., Ponomarev M.A., Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G. Assessment of the recreational potential of the Valdai National Park. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 4, pp. 97–111. (In Russ.).
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farberk S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P.P., Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, vol. 387, pp. 253–260.
- Ekonomika sokhraneniya bioraznobraziya. Spravochnik* [The Economics of Biodiversity Conservation. Guide]. Tishkov A.A., Ed. Moscow: Inst. Ekonom. Prirodopol. Publ., 2002. 604 p.
- Ekosistemnye uslugi Rossii. Prototip natsional'nogo doklada T. 1. Uslugi nazemnykh ekosistem* [Ecosystem Services of Russia. Prototype of the National Report. Vol. 1. Services of Terrestrial Ecosystems]. Bukhareva E.N., Zamolodchikov D.G., Eds. Moscow: Tsentr Okhrany Dikoi Prirody Publ., 2016. 148 p.
- Evolutsiya ekosistem Evropy pri perekhode ot pleistotsena k golotsenu (24–8 tys. l. n.)* [Evolution of Ecosystems in Europe During the Transition from the Pleistocene to the Holocene (24–8 Thousand Years Ago)]. Markov A.K., van Kolfschoten T., Eds. Moscow: Tovar. Nauch. Izd. KMK, 2008. 556 p.
- Geomorfologiya i chetvertichnye otlozheniya severo-zapada SSSR (Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti)* [Geomorphology and Quaternary Deposits of the North-West of the USSR (Leningrad, Pskov and Novgorod oblast)]. Leningrad: Nauka Publ., 1969. 256 p.
- Glazov M.V. *Rol' zhivotnykh v ekosistemakh elovykh lesov* [The Role of Animals in the Ecosystems of Spruce Forests]. Moscow: Pasva Publ., 2004. 239 p.
- Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireeva M.B. Transformation of spring flood and flood runoff in the Upper Volga basin under the influence of climatic changes. *Vodn. Khoz. Ross. Probl. Tekhnol. Upravl.*, 202, no. 4, pp. 6–28. (In Russ.).
- Gurevich A.V. Analysis and evaluation of long-term changes in the main hydrometeorological characteristics on Valdai. *Gidrosf. Opasn. Prots. Yavlen.*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 87–104. (In Russ.).
- Kazanskaya N.S., Lanina V.V., Marfenin N.N. *Rekreazionnye lesa* [Recreational Forests]. Moscow: Lesn. Promysh. Publ., 1977. 96 p.
- Klimanov V.A., Kozharinov A.V., Tishkov A.A. Paleogeological reconstructions of vegetation dynamics and climate of the Valdai Lake area in the Late Glacial period in the Holocene. *Tr. Nats. Par. Valdaiskii*, 2010, no. 1, pp. 254–261. (In Russ.).
- Konstantinov E.A., Panin A.V., Karpukhina N.V., Bricheva S.S., Borisova O.K., Naryshkina N.N., Gurinov A.L., Zakharov A.L. The Riverine Past of Lake Seliger. *Water Resour.*, 2021, vol. 48, no. 5, pp. 635–645. <https://doi.org/10.1134/S0097807821050110>
- Kozharinov A.V. Vegetation dynamics of Eastern Europe in the Late Glacial – Holocene. *Extended Abstract of Doct. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Institute of Ecology and Evolution Problems RAS, 1994. 60 p.
- Krenke A.N. Identification of invariant states of agricultural landscapes based on hierarchical factor analysis of remote information. *Prints. Ekol.*, 2020, no. 3, pp. 16–27. (In Russ.).
- Lavrov S.A., Kalyuzhny I.L. Influence of climatic changes on the spring flood runoff and factors of its formation in the Volga basin. *Vodn. Khoz. Ross.*, 2016, no. 6, pp. 42–60. (In Russ.).
- Malye reki basseina Volgi* [Small Rivers of the Volga Basin]. Alekseevsky N.I., Ed. Moscow: MSU Publ., 1998. 234 p.
- Mnogoletnie izmeneniya elementov vodnogo balansa na vodnobalansovykh i bolotnykh stantsiyakh* [Long-Term Changes in Water Balance Elements at Water Balance and Swamp Stations]. St. Petersburg: REAL LLC Publ., 2021. 202 p.
- Molchanov I.V. Lakes and sapropelite deposits of the Valdai upland. *Tr. Geomorf. Inst.*, 1933, vol. 6, pp. 27–45. (In Russ.).
- Morozova O.V., Belonovskaya E.A., Tsarevskaya N.G. *Sosudistye rasteniya natsional'nogo parka Valdaiskii (Annotirovannyi spisok vidov)*. Vyp. 7 [Vascular Plants of the Valdai National Park (Annotated List of Species). Vol. 7]. Moscow: Izd. Komis. RAN po sokhr. biol. raznobraziya, 2010. 95 p.
- Nedogarko I.V. *Valdaiskoe ozero: Nauchno-populyarnoe izdanie* [Valdai Lake: Popular Science Edition]. Tver: Tver. Gos. Univ. Publ., 2007. 52 p.
- Nedogarko I.V., Kuznetsova Yu.N., Reshetnikov F.Yu. Bottom sediments of lakes as an indicator of dynamic factors. *Meteor. Hydrol.*, 2005, no. 11, pp. 86–94. (In Russ.).
- Nedogarko I.V., Kuznetsova Yu.N., Reshetnikov F.Yu. Formation of a monitoring system for lakes of the Valdai National Park. *Tr. Nats. Par. Valdaiskii*, 2010, no. 1, pp. 114–131. (In Russ.).
- Nefedova T.G., Treivish A.I. *Puteshestvie iz Peterburga v Moskvu: 222 goda spustya. Kn. 1. Dva stoletiya Rossiiskoi istorii mezhdu Moskvoy i Sankt-Peterburgom* [Journey from St. Petersburg to Moscow: 222 Years Later. Book 1. Two Centuries of Russian History between Moscow and St. Petersburg]. Moscow: Lenand Publ., 2015. 240 p.
- Novenko E.Y. *Izmeneniya rastitel'nosti i klimata Tsentral'noi i Vostochnoi Evropy v pozdnem Pleistotsene i Golotsene v mezhlednikov'e i perekhodnye etapy klimaticheskikh makrotsiklov* [Vegetation and Climate Changes in Central and Eastern Europe in the Late Pleistocene and Holocene in the Interglacial and Transitional Stages of Climatic Macrocycles]. Moscow: GEOS Publ., 2016. 227 p.
- Orlov V.N., Kozlovskii A.I., Balakirev A.E., Borisov Yu.M. Endemic chromosome races of the common shrew *Sorex araneus* L. (Insectivora, Mammalia) and the possible preservation of refugia in the Late Valdai glaciation area. *Dokl. Biol. Sci.*, 2007, vol. 416, pp. 396–399. <https://doi.org/10.1134/S0012496607050225>
- Ozerova N.A., Snytko V.A., Shirokova V.A. Expedition to study the sources of the main rivers of European Russia (1894–1902). *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2015, no. 4, pp. 113–128. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-4-113-128>

- Ozhegov S.I. *Slovar' russkogo yazyka* [Dictionary of the Russian Language]. Moscow: Gos. Izd-vo Inostrannykh Yazykov i Natsional'nykh Slovari, 1953. 848 p.
- Petrova T.E., Tishkov A.A. Ecosystem approach to biodiversity conservation at regional and local levels. In *Perekhod k ustoichivomu razvitiyu: global'nyi, regional'nyi i lokal'nyi urovni. Zarubezhnyi opyt i problemy Rossii* [Transition to Sustainable Development: Global, Regional, and Local Levels. Foreign Experience and Problems of Russia]. Moscow: Tovar. Izd. KMK, 2002, pp. 267–286. (In Russ.).
- Pokrovskaya T.N., Mironova N.Ya., Shilkrot G.S. *Makrofitnye ozera i ikh evtrofirovaniye* [Macrophite Lakes and Its Eutrophication]. Moscow: Nauka Publ., 1983. 153 p.
- Preobrazhenskii V.S. *Teoreticheskie osnovy rekreatsionnoi geografii* [Theoretical Foundations of Recreational Geography]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 223 p.
- Printsipy i metody ekonomicheskoi otsenki zemel' i zhivoy prirody. Analiticheskii spravochnik* [Principles and Methods of Economic Assessment of Land and Wildlife. Analytical Reference Book]. Nesterova O.A., Tishkov A.A., Eds. Moscow: Inst. Ekon. Prirodopol., 2002. 96 p.
- Puzachenko Yu.G. Invariance of geosystems and their components. In *Ustoichivost' geosystem* [Stability of Geosystems]. Moscow: Nauka Publ., 1983, pp. 32–41. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G., Baibar A.S., Varlagin A.V., Krenke A.N., Sandler R.B. Thermal field of the South taiga landscape of the Russian plain. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 2, pp. 51–68. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G., Onufrenya I.A., Aleshchenko G.M. Spectral analysis of the hierarchical organization of relief. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2002, no. 4, pp. 29–38. (In Russ.).
- Rossolimo L.L. *Izmeneniya limnicheskikh ekosistem pod vliyaniem antropogennogo faktora* [Change of Limnic Ecosystems Under the Influence of Anthropogenic Factor]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 144 p.
- Sedov V.V. *Izbrannoe. Slavyane. Drevnerusskaya narodnost'* [Selected Writings. Slavs. Old Russian Nationality]. Moscow, 2005. 670 p.
- Shaporenko S.I., Shilkrot G.S., Tikhomirova A.V., Leonov A.V. Lake Seliger – the second source of the Volga. *Priroda*, 2002, no. 6, pp. 41–48. (In Russ.).
- Shilkrot G.S. *Tipologicheskie izmeneniya rezhimov ozer v usloviyakh kul'turnykh landshaftov* [Typological Changes in the Regime of Lakes in the Conditions of Cultural Landscapes]. Moscow: Nauka Publ., 1979. 168 p.
- Struktura i funktsionirovaniye geosistemy ozera Seliger v sovremennykh usloviyakh* [The Structure and Functioning of the Geosystem of Lake Seliger in Modern Conditions]. Belyakov V.P., Shaporenko S.I., Eds. Moscow: RAN Publ., 2004. 552 p.
- Subetto D.A. *Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii* [Bottom Sediments of Lakes: Paleolimnological Reconstructions]. St. Petersburg: Nauka Publ., 2009. 339 p.
- Subetto D.A. Lake sedimentogenesis of the north of the European part of Russia in the Late Pleistocene and Holocene. *Doct. Sci. (Geogr.) Dissertation*. St. Petersburg: Institute of limnology RAS, 2003. 378 p.
- Tillo A.A. A set of river levels, their fall, and a catalog of absolute heights of water levels in European Russia. *Zh. Minist. Putei Soob.*, 1892, no. 6, 131 p. (In Russ.).
- Tishkov A.A. *Biosfernye funktsii prirodnnykh ekosistem Rossii* [Biosphere Functions of Natural Ecosystems of Russia]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 309 p.
- Tishkov A.A., Gracheva R.G., Konstantinov E.A., Samus A.V. The Key Section of the Valdai Peat Bog as a Source of Paleoeological and Paleoclimatic Information. *Dokl. Earth Sci.*, 2023, vol. 508, pp. 34–41. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601870>
- Tishkov A.A. Natural and anthropogenic dynamics of spruce forests of Valdai. In *Organizatsiya ekosistem el'nikov yuzhnoi taigi* [Organization of Ecosystems of Spruce Forests of the Southern Taiga]. Moscow: Inst. Geogr., Akad. Nauk SSSR, 1979, pp. 30–69. (In Russ.).
- Tishkov A.A. Optimization of the Valdai agricultural landscape. Structure of agricultural lands. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1994, no. 3, pp. 74–84. (In Russ.).
- Tishkov A.A. Phytogenic mechanisms of stability of terrestrial geosystems. In *Faktory i mekhanizmy ustoichivosti geosistem* [Factors and Mechanisms of Stability of Geosystems]. Moscow: Nauka Publ., 1989, pp. 93–103. (In Russ.).
- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Tsarevskaya N.G. Lakes-reservoirs of the Valdai National Park and their contribution to the ecological state of the Upper Volga and Neva-Ladoga water systems. In *Vodokhranilishcha Rossiiskoi Federatsii: sovremennyye ekologicheskie problemy, sostoyaniye, upravleniye* [Reservoirs of the Russian Federation: Modern Environmental Problems, Condition, Management]. Novocherkassk: Lik Publ., 2019, pp. 8–15. (In Russ.).
- Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G., Novenko E.Yu., Belonovskaya E.A. Diagnostics of the Beginning of Agricultural Development of the Northwest of the East European Plain by Spore–Pollen Spectra. *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 499, pp. 686–692. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21080201>
- UN ECE. *Recommendations concerning payments for ecosystem services in the context of integrated water resources management*. New York; Geneva: UN, 2007. 65 p.
- Valdaiskie ozera (Obzor rezul'tatov nablyudenii za 1946–2018 gg.)* [Valdai Lakes (Review of Observation Results for 1946–2018)]. Nedogarko I.V., Ed. St. Petersburg: Real Publ., 2021. 242 p.
- Vedenin Yu.A. *Dinamika territorial'nykh rekreatsionnykh sistem* [Dynamics of Territorial Recreational Systems]. Moscow: Nauka Publ., 1982. 190 p.
- Zaitsev V.M. *Valdai. U istokov velikikh rek* [Valdai. At the Headwaters of the Great Rivers]. St. Petersburg: IPTS SPGUTD Publ., 2009. 148 p.

ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВОЛГИ

УДК 556.5.01

СТОК ВОЛГИ В ЭПОХИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2023 г. А. Г. Георгиади^а, *, И. П. Милюкова^а

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: georgiadi@igras.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Выявлены сходства и различия климатических условий (температуры воздуха и атмосферных осадков), годового и сезонного стока, а также гидрографов стока Волги у Волгограда в эпохи глобального потепления геологического прошлого, периода современного (начиная с 1981 г.) и сценарного глобального потепления в XXI в. Изменения стока геологического прошлого и сценарного будущего были оценены на основе модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН, и уравнения среднего многолетнего водного баланса. В качестве климатических условий для оценки изменений стока использованы результаты традиционных и модельных палеоклиматических реконструкций и климатических сценариев глобального потепления в XXI в. Современные многолетние изменения стока Волги проанализированы на основе представлений о долговременных контрастных фазах. В результате проведенного анализа показано, что годовой сток Волги в условиях теплых эпох микулинского межледниковья и атлантического оптимума голоцена (если исходить из палеоклиматических реконструкций, основанных на ископаемой пыльце растений) был ниже современного. Тогда как согласно модельным палеоклиматическим реконструкциям теплых эпох голоцена, климатическим сценариям антропогенного потепления, а также в условиях современного глобального потепления годовой сток Волги оказывается выше, чем в базовый период. Выявлены значительные различия в изменениях сезонного распределения стока Волги между всеми рассмотренными теплыми эпохами. При этом изменения сезонного распределения при современном глобальном потеплении сходны с теми, что можно ожидать при сценарном потеплении в первой трети и в середине текущего столетия (за исключением стока половодья). Выявлена тесная корреляция между аномалиями изменений годовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков во все рассмотренные теплые эпохи. В период инструментальных наблюдений долговременные фазы повышенного/пониженного стока Волги синхронны с соответствующими фазами индекса Северо-Атлантического колебания и периодами повышения и понижения годовых уровней Каспийского моря.

Ключевые слова: глобальное потепление, теплые геологические эпохи, сценарное потепление, изменения годового и сезонного стока, долговременные фазы, методы оценки изменений стока

DOI: 10.31857/S2587556623060079, **EDN:** ECSJKJF

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1970–1980-х годов (Будыко, 1980) все более заметный акцент в исследованиях делался на оценке изменений климата и их последствий (в том числе гидрологических), которые со временем все в большей мере ассоциировались с преобладающим влиянием антропогенных факторов, приводивших к росту содержания парниковых газов в атмосфере в результате хозяйственной деятельности. Примерно к тому же времени относятся и первые исследования теплых эпох геологического прошлого и связанных с ними гидрологических условий (Величко и др., 1988, 1992; Георгиади, 1992; Кислов, 1993; Atlas..., 1992; Georgiadi, 1990). Тогда же появились первые оценки возможных изменений климата в будущем в рамках

парадигмы антропогенного глобального потепления, а также попытки использования для этого геологических аналогов потепления. Представление об антропогенном характере потепления, начиная с 1990-х годов, стало господствующим. И только в последние 10–15 лет (особенно после “перерывов” в потеплении — warming hiatus) и по мере получения результатов исследований изменений климата разного масштаба, вызванных механизмами не связанными с деятельностью человека, выдвигаются идеи об учете долгопериодной цикличности в оценках современных и возможных в будущем изменениях климата, в том числе возможного похолодания, вызванного, например, изменениями океанической циркуляции

(Панин и др., 2017; Шерстюков, 2021; Caesar et al., 2021).

В эти же годы были проведены исследования стока рек в теплые геологические эпохи (Величко и др., 1988, 1992; Atlas ..., 1992). Одним из авторов статьи был предложен подход для реконструкций палеостока, который был основан на зональных связях среднего многолетнего годового стока с годовой суммой атмосферных осадков, среднегодовой температурой воздуха и годовой испаряемостью (Георгиади, 1980-е годы, личное сообщение). Впервые такой подход для этих целей, видимо, был использован С.А. Шуммом (1968). Аналогичный подход широко использовался в нашей стране начиная с 1970-х годов для исследования географических закономерностей распределения стока и других составляющих водного баланса на глобальном и региональном уровнях (Львович, 1974; Мировой ..., 1974).

Активно развивался подход к реконструкции речного стока, основанный на характеристиках палеомеандр (Сидорчук, Панин, 2017; Сидорчук и др., 2019; Borisova et al., 2006), а также археологических данных (Panin and Nefedov, 2010), геоморфологических и седиментологических индикаторов (Panin and Matlakhova, 2015).

В начале 2000-х годов для реконструкций стока геологических эпох, а также для расчетов сценарных изменений стока в результате возможного глобального потепления в XXI в. в Институте географии РАН была разработана модель месячного водного баланса — ММВБ (Георгиади, Милюкова, 2002, 2007; Георгиади и др., 2011, 2014). На основе этой модели были проведены исследования изменений речного стока крупнейших рек Русской равнины (Волги, Дона и Днепра) и Восточной Сибири (Лены) в сценарных условиях XXI в. и в теплые геологические эпохи (Георгиади, Милюкова, 2002, 2007; Георгиади и др., 2011, 2014). Для расчетов сценарных изменений годового речного стока был использован также и другой (климатический) подход, исходящий из результатов воднобалансовых оценок, выполненных на основе данных о сценарных атмосферных осадках и испарении, рассчитанных на ансамбле глобальных климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана — КМОЦАО (Georgiadi et al., 2021). Следует отметить, что модельный подход для исследований изменений стока в теплые геологические эпохи и в сценарных климатических условиях XXI в. развивался в России в последние двадцать с лишним лет (Водные ..., 2008; Георгиевский, Голованов, 2019; Георгиевский и др., 1996; Гусев, Насонова, 2010; Кислов и др., 2008; Мотовилов, Гельфан, 2019; Мохов и др., 2003).

В 1950–1970-е годы для исследования многолетних изменений стока воды в период инстру-

ментальных наблюдений была высказана идея о долговременных фазах (периодах) повышенного/пониженного стока (Андреянов, 1959; и др.). Потом этот подход почти не развивался (основное внимание уделялось разработке статистических методов расчетов стока и физико-математических методов гидрологического моделирования). Такие долговременные контрастные фазы водности рек — одна из фундаментальных особенностей многолетних изменений стока (Болгов и др., 2018; Водные ..., 2008; Георгиади, Кашутина, 2006; Георгиади и др., 2011, 2014; Georgiadi and Groisman, 2022; Georgiadi et al., 2020). Авторами статьи с начала 2000-х годов исследуются долговременные контрастные фазы в многолетних изменениях годового и сезонного стока крупных и средних рек России и других регионов мира (Георгиади, Кашутина, 2016; Георгиади и др., 2011, 2014). Использование свойств продолжительных контрастных фаз, закономерностей их смены могут создать основу для совершенствования методов гидрологических расчетов и подходов для сценариев возможной водности рек в среднесрочной перспективе (Болгов и др., 2016).

Данная статья посвящена сравнительному анализу оценок речного стока Волги, полученных для условий теплых эпох геологического прошлого, инструментального периода и сценарного будущего на основе модельного подхода и подхода, исходящего из анализа продолжительных контрастных фаз, свойственных многолетним изменениям речного стока, наблюдаемым в период инструментальных наблюдений. Сравняются климатические условия, годовой и сезонный сток, а также гидрографы стока Волги у Волгограда в эпохи глобального потепления в геологическом прошлом (оптимумы микулинского межледниковья (~125 тыс. л. н.) и теплые эпохи голоцена), в период современного (начиная с 1981 г.) и сценарного глобального потепления в XXI в. Изменения были оценены на основе модели месячного водного баланса и уравнивания среднего многолетнего годового водного баланса, основанного на данных о сценарных атмосферных осадках и испарении, рассчитанных на глобальных КМОЦАО, а также в результате анализа долговременных фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока. Используются палеоклиматические реконструкции, основанные на данных о растительности прошлого, реконструированной путем спорово-пыльцевого анализа отложений соответствующего возраста (Палеоклиматы ..., 2009; Atlas ..., 1992) и результатах палеоклиматических оценок, выполненных на ансамбле глобальных климатических моделей международной программы сравнения палеоклиматического моделирования PMIP-II (Ackerley et al., 2017). Оценки основывались также на данных климатических сценариев антропогенного по-

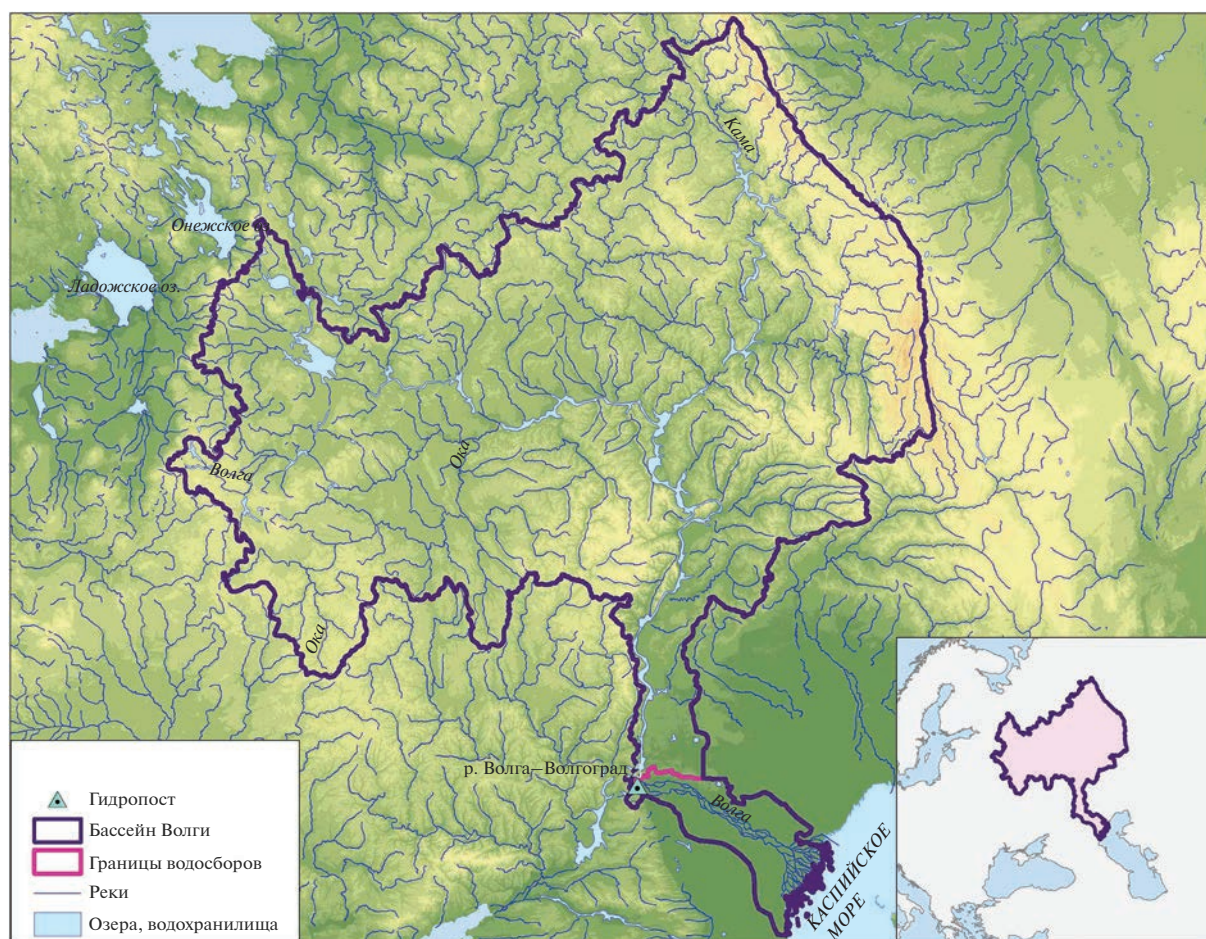


Рис. 1. Картограмма бассейна Волги.

тепления в XXI в., полученных в рамках программ МГЭИК/IPCC CMIP3 и CMIP5 на основе ансамбля глобальных климатических моделей (Meehl et al., 2007)¹.

ХАРАКТЕРИСТИКА БАССЕЙНА ВОЛГИ

Волга — крупнейшая река (площадь бассейна в створе Волгограда составляет 1360 тыс. км²) южного макросклона Русской равнины (рис. 1) исторически играет важнейшую роль в жизни нашего государства и испытывает в ходе хозяйственного освоения значительную антропогенную нагрузку. Наряду с этим сток реки изменялся на протяжении геологического и исторического времени и в современных условиях под влиянием природных факторов, связанных с изменениями климатических условий.

Географическая зональность в бассейне Волги носит субширотный характер. Преобладают шесть

основных зональных комплексов (Arc Atlas ..., 1996): таежный (занимает около 34% общей территории бассейна), смешанных лесов (более 40%), лесостепной (15%), степной (9%), а также полупустынный и интразональный. В результате хозяйственного освоения природная ландшафтная структура бассейна в значительной мере изменена. В бассейне Волги преобладают антропогенно-измененные (63% территории бассейна) и вторично-преобразованные (35%) ландшафты, используемые, главным образом, в неорошаемом земледелии. Значительное влияние на сток и водный режим Волги и ее притоков (Камы, Суры, Москвы и др.) оказывают водохранилища. Полный объем восемнадцати крупнейших из них составляет 197 км³, а полезный — 91 км³. Наиболее крупные из них были возведены в период с 1940-х до начала 1980-х годов. Они кардинально изменили водный режим реки.

Условно-естественный, или восстановленный (о методе восстановления стока будет сказано ниже) средний многолетний годовой сток Волги (осредненный за 1882–2020 гг.) составил бы 258 км³

¹ <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/> (дата обращения 15.05.2023).

(наблюдаемый сток в этот период не превышал 250 км³). В период антропогенно-измененных условий формирование стока происходило под влиянием как климатических изменений, так и антропогенных факторов. При этом сток половодья в условно-естественных условиях составлял бы 55.6%, летне-осенний сток 30.2%, а зимний 14.2% от годового стока. В период заметного антропогенного воздействия внутригодовая структура стока Волги существенно изменилась (Георгиади и др., 2014).

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Инструментальный период наблюдений

Методы

Методы восстановления и анализа долговременных фаз повышенного/пониженного речного стока. Многолетние ряды восстановленного годового и сезонного стока Волги у Волгограда, полученные ранее на основе метода рек-индикаторов климатических изменений, который изложен в (Георгиади и др., 2014), были продлены до 2020 г.

Границы между длительными фазами пониженных и повышенных значений годового и сезонного стока воды были определены с использованием разностно-интегральных кривых (РИК) в сочетании с оценкой статистической однородности многолетних рядов по средним значениям, определенной для длительных фаз с использованием параметрических и непараметрических критериев. Эти методы подробно изложены в публикациях авторов (Георгиади и др., 2014; Georgiadi and Groisman, 2022; Georgiadi et al., 2018).

Разностно-интегральные кривые представляют собой нарастающую сумму отклонений определенной характеристики от ее среднего значения, рассчитанного за весь период наблюдения (Андреянов, 1959; Георгиади и др., 2014). Они используются для определения границ длительных фаз (10–15 и более лет) в многолетних изменениях характеристики, в течение которых их средние значения были выше или ниже их среднего многолетнего значения за весь период наблюдений. В большинстве рассмотренных случаев годы смены длительных контрастных фаз могут быть определены на основе экстремальных (минимальных или максимальных) значений РИК. Они дают наглядное графическое представление о границе перехода между длительными фазами пониженных/повышенных значений характеристик.

Метод оценки изменений стока в период современного глобального потепления основан на сравнении восстановленного (условно-естественного) стока для периода современного глобального потепления и базового периода, отличающихся

между собой климатическими условиями (Георгиади и др., 2014, 2019; Georgiadi et al., 2019).

Использованные данные

Многолетние ряды речного стока. Основу исследований составили многолетние ряды наблюдаемых средних месячных, средних сезонных и средних годовых фактических (наблюдаемых) расходов воды, а также ряды восстановленных (с исключенными изменениями, обусловленными антропогенными воздействиями) средних сезонных и средних годовых расходов воды Волги в створе Волгограда (гидроузел Волжской ГЭС). Наблюдаемые ряды стока Волги состоят из двух частей: с начала периода наблюдений (1882 г.) и до 1940 г. (до начала заполнения Рыбинского водохранилища) с относительно слабо заметным антропогенным влиянием и период, когда антропогенные воздействия начали заметно изменять сток Волги (с 1941 г.).

Для исследования сопряженности многолетних изменений стока Волги у Волгограда и уровня Каспийского моря были использованы многолетние ряды средних годовых уровней у г. Махачкалы (1900–2008 гг.), подготовленные в Государственном океанографическом институте². Ряд был продлен на основе материалов Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, опубликованных в интернете³.

Сопряженность многолетних изменений стока Волги у Волгограда, уровня Каспийского моря и макромасштабной атмосферной циркуляции анализировалась с использованием многолетнего ряда индекса Северо-Атлантического колебания – САК (Northern Atlantic Oscillation – NAO) (Jones et al., 1997). Индекс САК рассчитывается как разность давления на уровне моря за зимний период (декабрь–март) между Гибралтаром и Стиккисхумльмур/Рейкьявик, Исландия⁴. Многолетние изменения этого индекса (так же, как и ряда других известных индексов атмосферной циркуляции) отражают изменения интенсивности зонального переноса (Георгиади, Кашутина, 2016).

Для исследования многолетних изменений средней годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков в бассейне Волги были использованы многолетние ряды средних месячных значений указанных метеорологических

² <http://www.oceanography.ru/index.php/2010-03-15-15-57-22/2010-03-15-15-59-06/211-2011-02-01-15-38-38> (дата обращения 15.05.2023).

³ <https://informburo.kz/stati/uroven-kaspiya-dostig-kriticeskoi-otmetki-kak-spasti-stremitelno-meleyushhii-vodoyom> (дата обращения 15.05.2023).

⁴ <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/> (дата обращения 15.05.2023).

элементов из архива ВНИИГМИ-МЦД⁵ и глобального архива Университета Восточной Англии⁶.

Теплые эпохи геологического прошлого и сценарного будущего

Методы

Модель месячного водного баланса, разработанная авторами в начале 2000-х годов, использовалась в качестве основного инструмента для расчетов речного стока крупных рек России в условиях теплых эпох геологического прошлого и в условиях сценарных изменений климата в XXI в. (Георгиади, Милюкова, 2002; Георгиади и др., 2014). В ее основе лежит уравнение среднегогодового месячного водного баланса речных водосборов для расчетных ячеек регулярной сетки, размер которых может меняться. Расчеты проводятся по квазисуткам, т.е. среднемесячные значения температуры воздуха и атмосферных осадков интерполируются по суткам в пределах каждого месяца на основе использования разработанных авторами алгоритмов, которые подробно изложены в их публикациях (Георгиади, Милюкова, 2002; Георгиади и др., 2014). Модель прошла апробацию для условий крупных речных бассейнов, расположенных в разных природных зонах России, включая зону вечномёрзлых грунтов (Георгиади и др., 2011). Для расчетов изменений речного стока в теплые климатические эпохи прошлого и сценарного будущего использовались относительные отклонения (в %) климатических характеристик этих временных срезов от их современных значений, что позволяло во многом сгладить различия в значениях расчетных климатических характеристик.

Оценка среднего многолетнего годового речного стока крупных рек России для нескольких срезов сценарного потепления климата основана на использовании уравнения среднего многолетнего водного баланса и данных о сценарных средних многолетних годовых суммах атмосферных осадков и годового испарения, полученных осреднением результатов расчетов, проведенных в рамках программы CMIP5 на 30-ти глобальных климатических моделях (КМОЦАО) для ансамблей двух контрастных групп сценариев изменения климата (RCP 8.5 и RCP 2.6). Для этого данные модельных расчетов сумм атмосферных осадков и испарения, представленные в узлах равномерной сетки $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ по широте и долготе, осреднялись для территории речных бассейнов. Аналогичным образом по данным о годовых суммах атмосферных осадков и испарения за ба-

зовый период (в качестве которого был принят период 1931–1980 гг.), осредненным по 30-ти КМОЦАО, рассчитывался современный годовой сток. На основе сравнения расчетных значений сценарного и современного стока оценивалось его относительное изменение в условиях потепления в первой трети и середине XXI в.

Использованные данные

Палеоклиматические реконструкции. Отклонения (от их современных значений) температуры воздуха и атмосферных осадков для микулинского межледникового были восстановлены на основе палеофлористических данных, исходя из метода, предложенного В.П. Гричуком (Палеоклиматы ..., 2009). В качестве базовых (для современного периода) были использованы средние многолетние данные, относящиеся к периоду до 1960–1970-х годов, относительно которых оценивались палеоклиматические отклонения. Климатические характеристики оптимума голоцена восстанавливались на основе информационно-статистического метода, разработанного В.А. Климановым (Палеоклиматы ..., 2009). Гидрологические оценки для оптимума голоцена были получены для двух вариантов палеоклиматических реконструкций. В одном из них к рассчитанному по палинологическим данным отклонению климатической характеристики добавлялась статистическая ошибка (и полученное значение принималось за “максимальное отклонение” от современных значений климатической характеристики). В другом случае статистическая ошибка вычиталась из исходного отклонения и полученное значение определялось как “минимальное отклонение”. При этом данные о январских отклонениях распространялись на месяцы холодного полугодия (октябрь–март), а июльские — на месяцы теплого полугодия (апрель–сентябрь).

Модельные палеоклиматические реконструкции среднемесячных аномалий [разницы между модельным климатом доиндустриального типа, который отнесен примерно к 1750 г. (Ackerley et al., 2017), и оптимумом голоцена], указанных выше климатических характеристик для каждого месяца среднего многолетнего года получены осреднением результатов расчетов, проведенных на 18 глобальных климатических моделях, включенных в программу PMIP-II⁷. Анализ длинных рядов средней годовой температуры воздуха в Санкт-Петербурге (начиная с середины XVIII в.), Нижнем Новгороде (с 1830-х годов), Казани и Волгограде (с середины XIX в.) показал, что годовая температура всего периода вплоть до начала потепления в 1980-х годах характеризовалась пониженными значениями.

⁵ <http://meteo.ru/> (дата обращения 15.05.2023).

⁶ <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data> (дата обращения 15.05.2023).

⁷ <https://pmip.lscce.ipsl.fr/> (дата обращения 15.05.2023).

Данные об отклонениях температуры воздуха и атмосферных осадков января и июля для условий теплых эпох голоцена (модельные теплые события 9, 6, 3 тыс. л. н.) были получены на основе расчетов, выполненных на глобальной климатической модели MSU, разработанной А.В. Кисловым (1993), которая была включена в ансамбль моделей международной программы сравнения палеоклиматического моделирования. Указанные выше теплые события были соотнесены автором модельных палеоклиматических реконструкций с известными палеогеографическими событиями: бореальным, атлантическим и субатлантическим потеплением соответственно. Палеоаномалии температуры воздуха и атмосферных осадков оценивались относительно их средних значений для периода 1960–1990 гг.

Климатические сценарии для временных срезов XXI в. Для расчетов изменений речного стока в бассейне Волги использованы климатические сценарии, подготовленные в рамках программ CMIP3 и CMIP5⁸ (Meehl et al., 2007). В каждой из этих программ для расчетов использованы те из четырех семейств сценариев, которые характеризуются наиболее (A2 из программы CMIP3 и RCP 8.5 из программы CMIP5) и наименее (B1 – CMIP3, RCP 2.6 – CMIP5) интенсивным ростом средней глобальной годовой температуры воздуха для периодов 2010–2039 и 2040–2069 гг., первый из которых условно отнесен к 2025 г., второй – к 2050 г. Такой подход на основе учета наиболее широкого диапазона возможных климатических изменений обусловлен отсутствием критериев выбора какого-либо из четырех возможных семейств (групп) имеющихся климатических сценариев. Аномалии среднемесячных средних многолетних значений температуры воздуха и сумм атмосферных осадков для указанных выше сценарных периодов получены по результатам расчетов, проведенных на ансамбле КМОЦАО. При этом среднеансамблевые сценарные значения определены на основе результатов расчетов на 10 глобальных климатических моделях, отобранных из всего ансамбля моделей, включенных в программу CMIP3, на основе сравнения характеристик современного модельного и наблюдаемого климата для территории Русской равнины (Кислов и др., 2008). Тогда как среднеансамблевые сценарные климатические характеристики, полученные в рамках программы CMIP5, осреднялись по результатам расчетов, проведенных на 30 климатических моделях, включенных в эту программу. Сценарные аномалии температуры воздуха и атмосферных осадков оценивались относительно их современных значений, рассчитанных для периода 1960–1990 гг.

⁸ <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/> (дата обращения 15.05.2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Период инструментальных наблюдений

Период современного глобального потепления, которое в рамках распространенной парадигмы ассоциируется, прежде всего, с антропогенными воздействиями, и его гидрологические последствия зачастую рассматриваются в отрыве от многолетней динамики стока рек. Значительное число публикаций посвящено оценке изменений гидрологических характеристик в период современного глобального потепления относительно более холодного базового периода (Водные ..., 2008; Георгиади и др., 2019; Georgiadi et al., 2019). Однако не меньший интерес в последнее время вызывает проблема исследования долговременных периодов (фаз) повышенного/пониженного годового и сезонного стока. Они, последовательно сменяя друг друга, представляют собой важную особенность многолетней динамики гидрологических характеристик, вызванных климатическими изменениями, а разница в стоке таких контрастных фаз чаще всего оказывается статистически значимой. Продолжительность этих фаз составляет 10–15 лет и более и может достигать многих десятилетий. В этом отношении уже исследован годовой и сезонный сток воды рек России (Болгов и др., 2018; Водные ..., 2008; Георгиади и др., 2014; Georgiadi and Danilenko, 2022; Georgiadi and Groisman, 2022; Georgiadi et al., 2018, 2021). В этом разделе мы рассматриваем, как соотносятся между собой указанные два аспекта в исследовании современных изменений стока Волги.

Долговременные фазы повышенных/пониженных значений гидроклиматических характеристик

Долговременные фазы (продолжительностью 10–15 и более лет) повышенного/пониженного восстановленного годового и сезонного стока Волги у Волгограда – важная закономерность их многолетних изменений (рис. 2, табл. 1).

Длительность контрастных фаз в многолетних изменениях годового и сезонного стока Волги изменялась в широких пределах (см. табл. 1). Для стока половодья она варьировала от 11 (фаза повышенного стока) до 26 лет (фаза пониженного стока), для стока летне-осеннего периода от 18 (фаза повышенного стока) до 82 лет (фаза пониженного стока), для зимнего стока от 42 лет (фаза повышенного стока) до 91 года (фаза пониженного стока), а для годового стока от 8 (фаза пониженного стока) до 55 лет (фаза пониженного стока). При этом общая продолжительность фаз пониженного стока как годового, так и сезонного стока превышала продолжительность их противоположенных фаз. Наименьшая разница между ними характерна для стока половодья (ФНС 59 го-

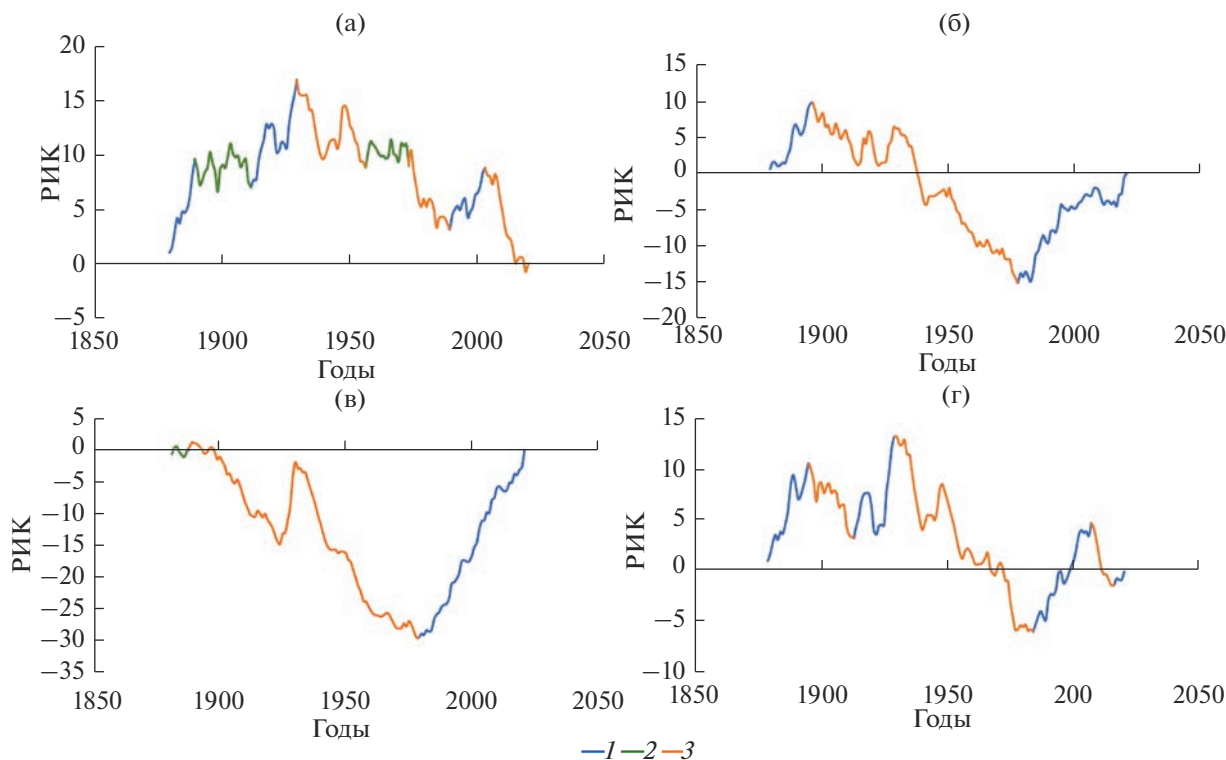


Рис. 2. Долговременные фазы (выраженные в координатах разностно-интегральных кривых, РИК) в многолетних изменениях восстановленного стока Волги у Волгограда за половодье (а), летне-осенний период (б), зимний период (в) и год (г). 1 – фаза повышенного стока, 2 – фаза, средний сток которой близок к среднему многолетнему стоку всего периода наблюдений, 3 – фаза пониженного стока.

да, ФВС 53 года) и годового стока (ФНС 81 года, ФВС 63 года), тогда как для стока меженных сезонов она была наибольшей и составляла соответственно для зимнего стока и стока летне-осеннего сезона для ФНС 91 и 82 года, для ФВС 42 года и 61 лет. Отметим, что в многолетних изменениях стока половодья наблюдались два периода (общей продолжительностью 40 лет), для которых средний сток был близок к многолетней норме стока, рассчитанной для всего периода наблюдений.

Наибольшая степень синхронности длительных фаз повышенного или пониженного годового и стока разных сезонов года между собой наблюдалась в многолетних изменениях следующих сочетаний сезонного и годового стока: стока меженных сезонов; годового стока и стока меженных сезонов; годового стока и стока половодья, а наименьшая для стока половодья и зимнего стока, а также для годового стока, стока половодья и зимнего стока (табл. 2).

Наибольшая разница среднего стока контрастных фаз характерна для зимнего стока (37%), тогда как для стока летне-осеннего периода она существенно меньше (19%), а для годового стока и стока половодья она составляет соответственно 16 и 17%.

Продолжительность и годы смены контрастных фаз годового фактического (включающего период антропогенно-измененного стока) и восстановленного стока Волги у Волгограда мало отличаются между собой (рис. 3) в отличие от фаз сезонного стока (Георгиади и др., 2014).

Рассмотренные выше долговременные контрастные фазы в многолетних изменениях стока Волги начиная с 1930-х годов тесно сопряжены с соответствующими фазами пониженных/повышенных значений среднегодовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков, осредненных для бассейна Волги (рис. 4). По данным наблюдений на метеорологических станциях ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета (начало многолетних рядов в них относится к 1936 г.), осредненных для бассейна Волги, выявляются две контрастные фазы. С 1930-х годов наблюдалась фаза их пониженных значений, которая сменилась в 1989 (для температуры воздуха) и в 1975 г. (для атмосферных осадков) на противоположную фазу. При рассмотрении более продолжительных рядов данных климатических характеристик (интерполированных в узлы равномерной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготу, а также осредненных для бассейна Волги), начало которых относится к 1901 г.

Таблица 1. Характеристика долговременных контрастных фаз годового и сезонного стока Волги у Волгограда

Фаза	Речной сток			
	годовой (январь—декабрь)	половодье (апрель—июнь)	летне-осенний (июль—ноябрь)	зимний (декабрь—март)
Пониженного стока (ФНС)	1896–1913/18/7742*	1930–1956/27/15524	1897–1978/82/4854	1888–1978/91/2783
	1930–1984/55/7701	1974–1989/16/15325	—	—
	2008–2016/9/7294	2004–2020/17/14910	—	—
Осредненный речной сток для всех наблюдавшихся фаз пони- женного стока (ФНС _{ав})	7764	15293	4854	2783
Повышенного стока (ФВС)	1879–1895/17/9036	1879–1889/11/18619	1879–1896/18/5934	1979–2020/42/3817
	1914–1929/16/9033	1912–1929/18/17749	1978–2020/43/5698	—
	1985–2007/23/8694	1990–2003/14/17368	—	—
Осредненный речной сток для всех наблюдавшихся фаз повы- шенного стока (ФВС _{ав})	8872	17848	5768	3817
Фаза, сток которой близок к среднему многолетнему стоку (ФВС _{ав} – ФНС _{ав})	—	1890–1911/22/15983	—	—
	1208	1957–1973/17/16233	914	1034
(ФВС _{ав} – ФНС _{ав}), % относи- тельно ФНС _{ав}	16	2555	19	37
		17		

Примечание. * Годы/число лет/среднее значение расхода воды (м³/с).

Таблица 2. Количество лет с синхронными долговременными фазами годового и сезонного стока Волги у Волгограда

Сочетание годового и сезонного стока	Количество лет в синхронных фазах		
	фаза пониженного стока	фаза повышенного стока	всего
Летне-осенний/зимний	82	29	111
Годовой/зимний	65	44	109
Годовой/летне-осенний	57	51	108
Годовой/сток половодья	56	47	103
Годовой/сток половодья/летне-осенний	48	44	92
Годовой/и три сезона	49	39	88
Сток половодья/летне-осенний	56	24	80
Сток половодья/зимний	49	25	74
Годовой/сток половодья/зимний	49	19	68

(Георгиади и др., 2014 г.)⁹, также выявляются две продолжительные контрастные фазы. Отметим, что в основе архива сеточных данных лежат многолетние данные, полученные на государственной гидрометеорологической сети наблюдений России. При этом годы смены контрастных фаз в этих двух рядах данных разной продолжительности для атмосферных осадков совпадают, а для температуры воздуха они различались на девять лет (см. рис. 4а и 4в). Характер фаз для атмосфер-

ных осадков имеет более сложный характер по сравнению с температурой воздуха. Так, на фоне длительного периода пониженных атмосферных осадков наблюдались относительно короткие отрезки с повышенными осадками (в 1912–1916 годы, в 1920-е, 1940–1960-е годы). В эти периоды также формировался повышенный сток половодья и годового стока. В целом можно сделать вывод о том, что глобальное потепление проявилось в бассейне Волги начиная с середины 1970-х и в 1980-е годы, что выразилось в отчетливой смене фазы пониженных значений температуры воздуха и атмосферных осадков на противо-

⁹ <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data> (дата обращения 15.05.2023).

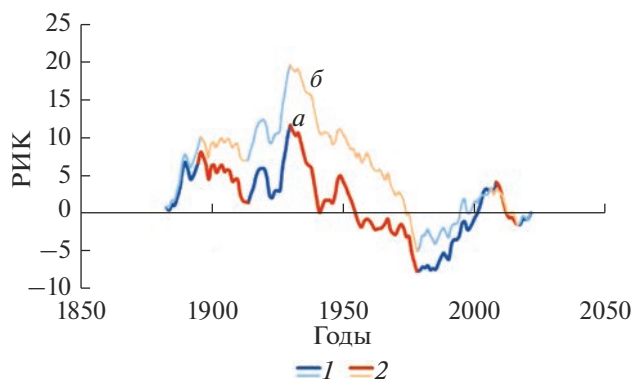


Рис. 3. Долговременные фазы (выраженные в координатах разностно-интегральных кривых, РИК) восстановленного (*а*) и наблюдаемого (антропогенно-измененного) (*б*) годового стока Волги у Волгограда. 1 – фаза повышенного стока, 2 – фаза пониженного стока.

положенную фазу. Примерно в эти же годы произошла смена аналогичных фаз годового и сезонного стока Волги у Волгограда (см. рис. 2).

Долговременные фазы наблюдаемого (антропогенно-измененного), но также (как было показано выше, см. рис. 3) и восстановленного повышенного/пониженного годового стока Волги у

Волгограда практически синхронны с соответствующими многолетними периодами повышенного/пониженного среднего годового уровня Каспийского моря (рис. 5). Ранее это было показано И.А. Шикломановым с коллегами (Shiklomanov et al., 2011). При этом самая длительная фаза пониженного стока Волги и период, характеризующийся долговременной тенденцией понижения уровня Каспия, выявляется в 1929–1977 гг. За ней последовала существенно менее продолжительная фаза повышенного стока Волги, продолжавшаяся до 2005 г. Она сопровождалась периодами повышения (1978–1995 гг.) и частично периодом снижения (1996–2018 гг.) уровня Каспия. Оставшаяся часть периода снижения уровня совпала, начиная с 2006 г., с фазой пониженного стока Волги. С 2016 г. наметился переход к фазе повышенного стока Волги.

Указанные выше длительные фазы повышенного/пониженного стока Волги и соответствующие периоды повышения/понижения годового уровня Каспийского моря изменяются во многом синхронно с соответствующими периодами усиления/ослабления зонального переноса в зимний период, что соответствует длительным фазам повышенных/пониженных значений индекса САК. Аналогичный вывод относительно сопряженности многолетних изменений стока Волги и индек-

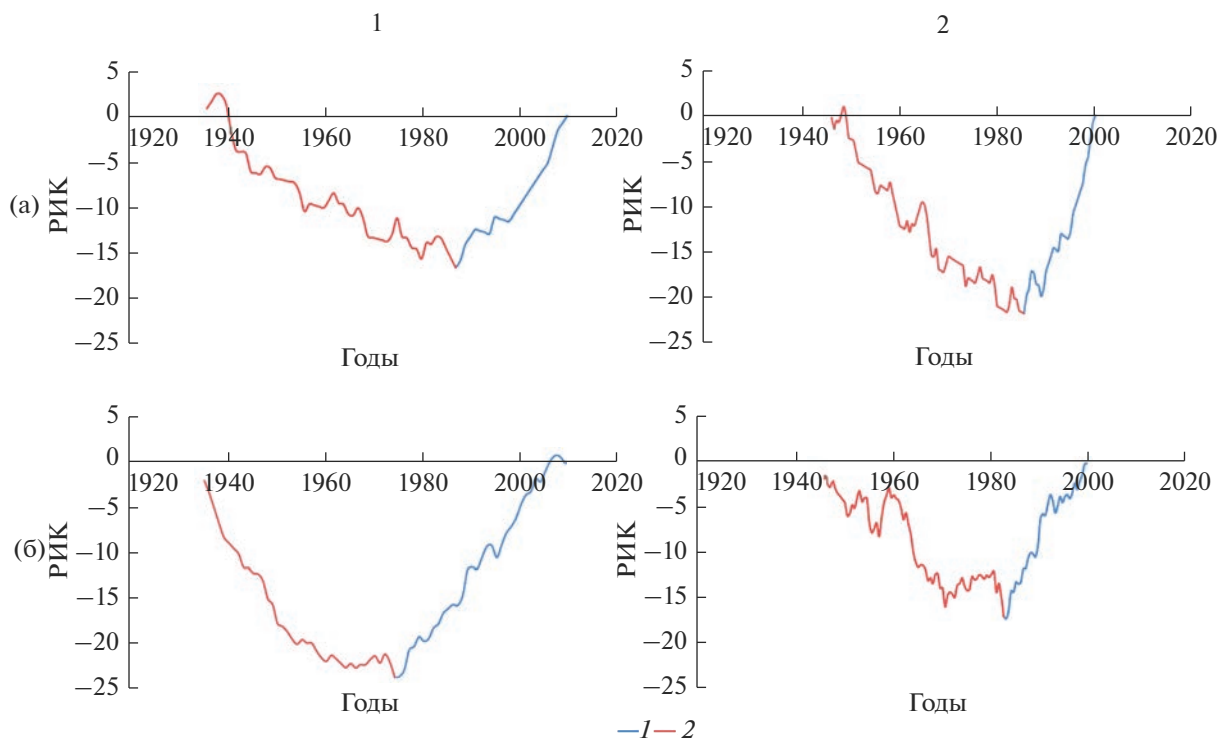


Рис. 4. Долговременные фазы (выраженные в координатах разностно-интегральных кривых, РИК) в многолетних изменениях средней годовой температуры воздуха (*а*) и суммы атмосферных осадков (*б*), осредненных по бассейну Волги у Волгограда по данным ВНИИГМИ-МЦД (1) и по данным Университета Восточной Англии (2). 1 – фаза повышенных значений, 2 – фаза пониженных значений температуры воздуха и суммы атмосферных осадков.

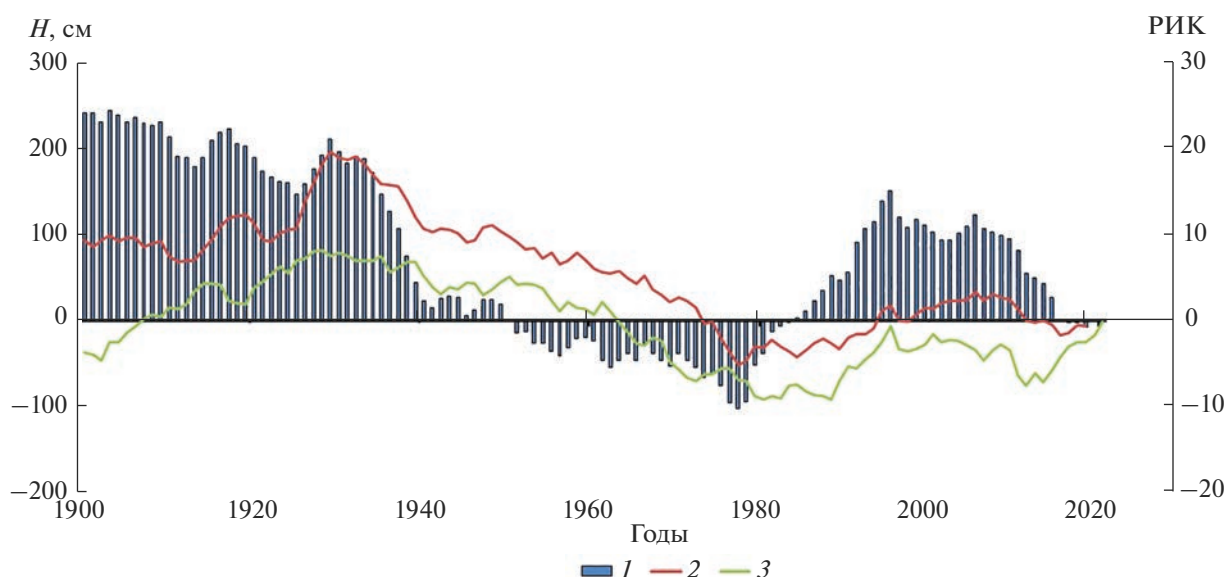


Рис. 5. Уровни Каспийского моря у Махачкалы (1), долговременные фазы (выраженные в координатах разностно-интегральных кривых, РИК) годового фактического стока Волги у Волгограда (2) и индекса североатлантического колебания (3).

са САК на основе метода скользящего осреднения был сделан ранее (Попова, Георгиади, 2017). Долговременные фазы и других известных индексов макромасштабной атмосферной циркуляции [среди которых повторяемость западной формы атмосферной циркуляции (W) согласно типизации Г.Я. Вангенгейма, Арктического колебания (Arctic Oscillation) и ряда других, выявленные на основе метода разностно-интегральных кривых, тесно коррелированы между собой (Георгиади, Кашутина, 2016)]. Это объясняется тем, что каждый из них характеризует усиление или ослабление зонального переноса в атмосфере.

Изменение стока Волги у Волгограда в эпоху современного глобального потепления

Как было показано выше, начало периода современного глобального потепления (в качестве начала которого был принят 1981 г.) согласуется с продолжительной фазой повышенного летне-осеннего и зимнего стока. А вот для стока половодья в этот период наблюдаются две примерно равные по продолжительности контрастные фазы. Для годового стока в этот период наблюдается продолжительная фаза повышенного стока, вслед за которой выявляется более короткая (почти вдвое) фаза пониженного стока, которая, возможно, сменяется снова на фазу повышенного стока. Такие особенности динамики продолжительных фаз годового и сезонного стока в период современного глобального потепления определяют разницу в его годовом и сезонном стоке в сравнении с предшествующим (базовым) периодом. В

качестве базового использован период 1931–1980 гг., который характеризуется пониженными значениями средней годовой температуры воздуха (на 1°C) и суммой атмосферных осадков (на 25 мм, или на 4%) и практически совпадает с долговременной фазой пониженного стока каждой из его составляющих.

За период современного глобального потепления восстановленный (с исключенным антропогенным изменением) годовое стока Волги по сравнению с базовым периодом был выше современного на 8%. Сток половодья практически не изменился (увеличился на немногим более 1%), тогда как заметно выше стал сток зимней межени (на 47%), а также сток летне-осеннего периода (на 19%).

Теплые эпохи геологического прошлого

Климатические условия

Палеоклиматические реконструкции, основанные на ископаемой пыльце растений (Палеоклиматы ..., 2009). В рассмотренные теплые геологические эпохи наиболее заметными изменениями средней многолетней среднегодовой температуры воздуха (на 4.7°C) и суммой атмосферных осадков (на 13%), осредненной по бассейну Волги, по сравнению с базовым периодом [для которого согласно нашим расчетам на основе данных архива (Daily ..., 2007) атмосферные осадки составляли 590 мм, а температура воздуха 4°C] характеризуется теплая эпоха микулинского межледниковья (125 тыс. л. н.). В атлантический оп-

тимум голоцена аномалии температуры воздуха были существенно ниже ($1.7\text{--}2.3^\circ\text{C}$), а отклонения осадков не превышали 3% ($0.5\text{--}2.9\%$).

Модельные палеоклиматические реконструкции теплых эпох голоцена. По нашим оценкам, основанным на осреднении результатов, полученных на ансамбле глобальных климатических моделей, в атлантический оптимум голоцена аномалии атмосферных осадков (0.5%) и, особенно, температуры воздуха (0.4°C) были существенно меньше тех, что были получены традиционными методами палеоклиматических реконструкций. А оценки среднегодовых аномалий, полученные по расчетам, проведенным на глобальной климатической модели MSU (Георгиади, Милюкова, 2006; Кислов, 1993), показали для этого среза голоцена нулевую аномалию для температуры воздуха и отрицательную для атмосферных осадков (-4.1%). Тогда как для бореального и субатлантического потепления температура воздуха могла быть выше современной на 0.3 и на 0.1°C , а атмосферные осадки ниже на 3.5 и 0.7% соответственно.

Сток Волги в условиях теплых эпох геологического прошлого

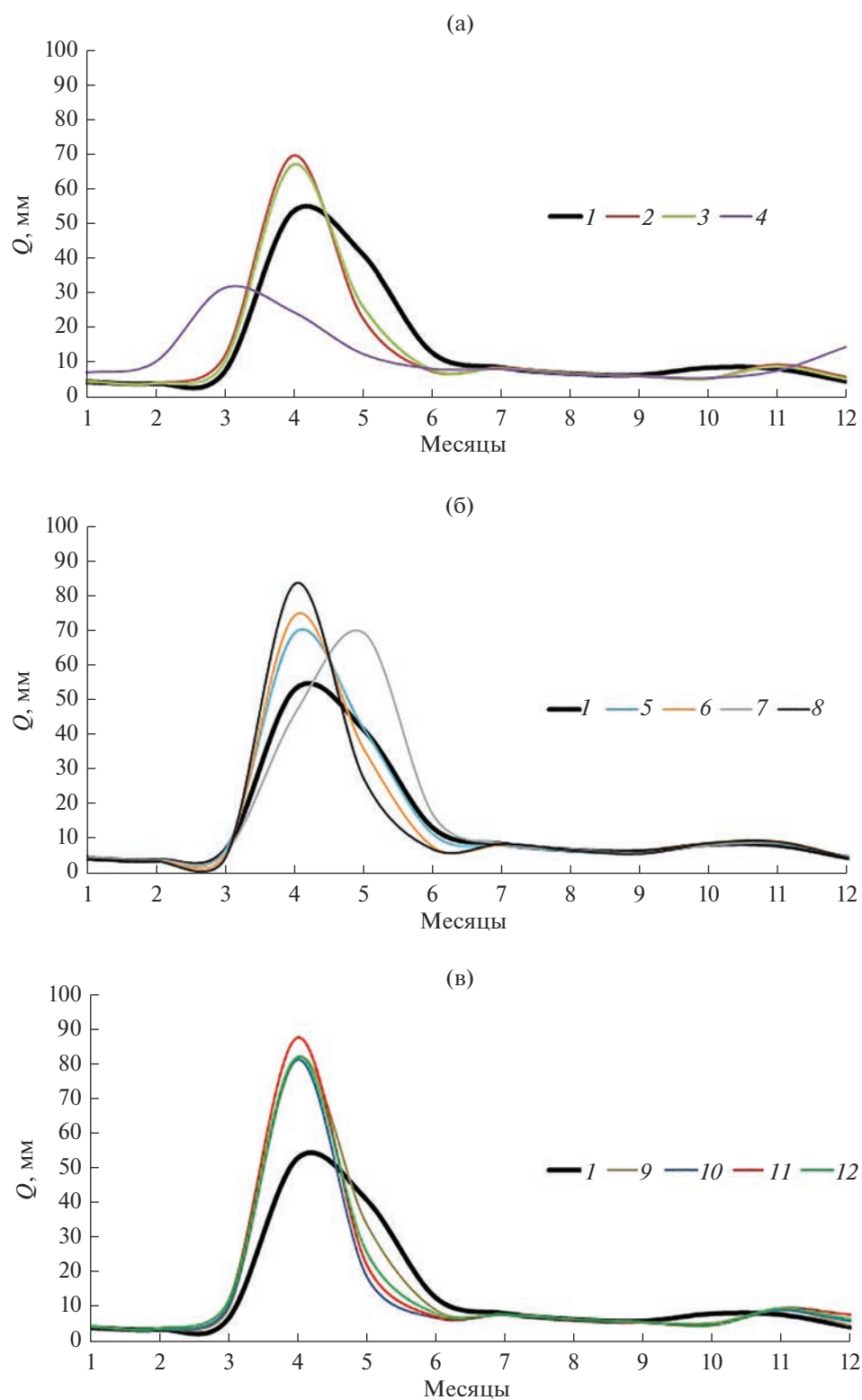
Годовой сток. Согласно расчетам на модели месячного водного баланса (Георгиади, Милюкова, 2002), годовой сток Волги в период оптимума микулинского межледниковья был заметно ниже (на 14.6%), чем в современных условиях (оценка дается относительно стока базового периода 1931–1980 гг.). В атлантический оптимум голоцена, согласно расчетам на ММББ, исходящим из палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологическом методе (Палеоклиматы ..., 2009), сток также был ниже современного (на $3.1\text{--}4\%$), что качественно совпадает с результатами, полученными на основе зональных зависимостей и палеомеандр (Величко и др., 1988, 1992; Сидорчук и др., 2012; Atlas ..., 1992). Оценки аномалий стока для этого периода, выполненные на ММББ и основанные на палеоклиматических реконструкциях, полученных на ансамбле климатических моделей программы PMIP-II и на модели MSU, напротив, говорят о том, что годовой

сток в этот период мог быть выше современного на 9 и 5.5% соответственно. Также как и годовой сток бореального (на 5.6%) и субатлантического потепления (на 8.5%), если исходить из палеоклиматических реконструкций, полученных на модели MSU.

Гидрографы стока. Анализируются гидрографы среднемесячного стока, полученные осреднением стока каждого месяца по всем расчетным ячейкам ($1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе), покрывающим бассейн Волги до г. Волгограда. В период оптимума микулинского межледниковья, исходя из палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологическом методе, гидрограф стока Волги был кардинально другим по сравнению с современными условиями (рис. 6а). Волна половодья была существенно более выположенной, а ее пик был смещен с апреля на март. В атлантический оптимум голоцена пик половодья не смещался, а основная волна половодья проходила за более короткое время. Если основываться на модельных палеоклиматических реконструкциях, то в среднеансамблевых палеоклиматических условиях атлантического оптимума пик половодья проходил в мае, а не в апреле, как в современных условиях, а согласно палеоклиматическим данным, полученным на модели MSU, он практически не смещался во времени. Исходя из палеоклиматических данных PMIP-II, существенно увеличивались расходы воды на пике половодья, но его форма изменялась не очень значительно. В целом аналогичные изменения характерны и для этих параметров волны половодья, рассчитанных на основе палеорекострукции климатических характеристик, полученных на модели MSU.

Распределение стока по гидрологическим сезонам года. В оптимум микулинского межледниковья внутригодовая структура стока Волги кардинально отличалась от современной (рис. 7б). Это связано, прежде всего, со значительно более теплыми (более чем на 8°C) зимними месяцами и сокращением периода с отрицательной температурой воздуха с пяти месяцев до трех. В результате сток за период половодья снижался на 36% , более чем в два раза повышался сток в зимний период и несколько увеличивался летне-осенний сток. Ана-

Рис. 6. Гидрографы стока Волги у Волгограда в теплые эпохи, рассчитанные на модели месячного водного баланса ИГ РАН по данным об атмосферных осадках и температуре воздуха, полученных на основе: (а) — палеоклиматических реконструкций теплых эпох микулинского межледниковья и оптимума голоцена, основанных на палинологических данных; (б) — палеоклиматических реконструкций теплых эпох голоцена, основанных на расчетах на глобальных климатических моделях; (в) — климатических сценариев антропогенного потепления в XXI в., рассчитанных на основе глобальных климатических моделей. 1 — базовый период (1931–1980 гг.), 2 — атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик, увеличенные на статистическую ошибку расчетов), 3 — атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик, уменьшенные на статистическую ошибку расчетов), 4 — микулинское межледниковье, 5 — субатлантическое потепление (глобальная климатическая модель MSU), 6 — атлантический оптимум голоцена (глобальная климатическая модель MSU), 7 — атлантический оптимум голоцена (осредненные палеоклиматические оценки на ансамбле глобальных климатических моделей программы PMIP-II), 8 — бореальное потепление (глобальная климатическая модель MSU). Осредненные климатические сценарии на ансамбле глобальных климатических моделей программ: 9 — CMIP3_A2_2011–2039, 10 — CMIP3_B1_2011–2039, 11 — CMIP3_A2_2040–2069, 12 — CMIP3_B1_2040–2069.



логичным образом изменялась сезонная структура в атлантический оптимум голоцена, если основываться на палеоклиматических реконструкциях, полученных на основе палинологического метода (см.

рис. 7б). Сток половодья был ниже (так же, как и годовой сток), а зимний и летне-осенний сток выше современного. При этом для стока половодья и зимнего стока масштабы аномалий были со-

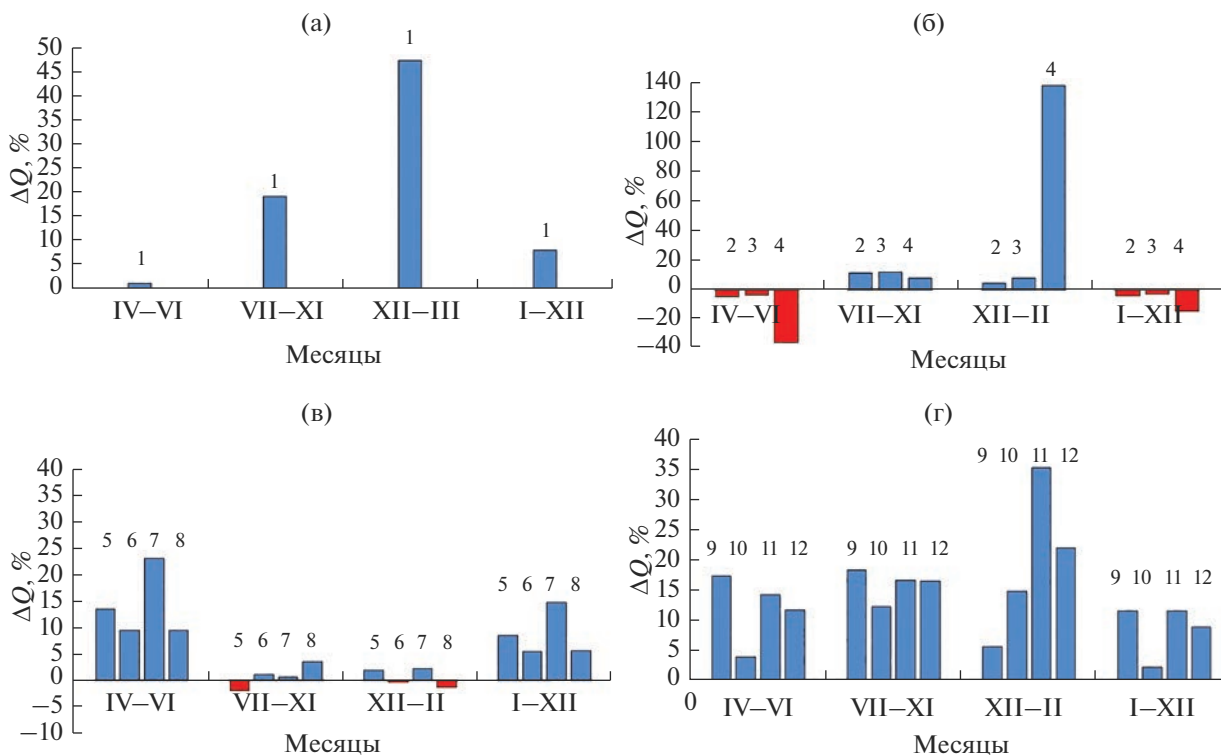


Рис. 7. Изменения годового и сезонного стока (%) в эпохи потепления по сравнению с базовым периодом (1931–1980 гг.): (а) – современное глобальное потепление; (б) – теплые эпохи микулинского межледникового и оптимума голоцена (палеоклиматические реконструкции основаны на палинологических данных); (в) – теплые эпохи голоцена (палеоклиматические реконструкции основаны на расчетах на глобальных климатических моделях); (г) – антропогенное потепление в XXI в. (климатические сценарии основаны на глобальных климатических моделях). 1 – изменение стока рассчитаны на основе многолетних рядов восстановленного стока, 2 – микулинское межледниковье, 3 – атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик увеличены на статистическую ошибку расчетов), 4 – атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик уменьшены на статистическую ошибку расчетов), 5 – бореальное потепление (глобальная климатическая модель MSU), 6 – атлантический оптимум голоцена (глобальная климатическая модель MSU), 7 – атлантический оптимум голоцена (осредненные палеоклиматические оценки на ансамбле глобальных климатических моделей программы PMIP-II), 8 – субатлантическое потепление (глобальная климатическая модель MSU). Осредненные климатические сценарии на ансамбле глобальных климатических моделей программ: 9 – CMIP3_A2_2011–2039, 10 – CMIP3_B1_2011–2039, 11 – CMIP3_A2_2040–2069, 12 – CMIP3_B1_2040–2069.

Примечание: изменения стока для (б), (в) и 7 рассчитаны на модели месячного водного баланса ИГ РАН.

вершенно другими. Если основываться на модельных палеоклиматических реконструкциях, то картина сезонной структуры стока Волги качественно отличалась. В этом случае и сток почти всех сезонов (за исключением слабозаметного снижения стока летне-осеннего сезона в субатлантическое потепление и зимнего сезона в период бореального потепления и атлантического оптимума) и годовой сток превышал современные их значения.

Сценарное глобальное антропогенное потепление XXI века

Климатические условия

Наши оценки среднеансамблевых сценарных изменений сумм атмосферных осадков и температуры воздуха для бассейна Волги, полученные

на основе глобальных архивов данных CMIP3 и CMIP5 программы МГЭИК/ИРСС (ИРСС, 2007) показывают, что диапазон возможных изменений годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков может составить соответственно для периода 2011–2039 гг. 1.4–2.2°C и 5.4–7.8%, а для периода 2040–2069 гг. – 2.5–4°C и 7–10.3%. Здесь и далее первое значение относится к семейству сценариев B1 и RCP2.6 (наименее интенсивное среднеглобальное потепление), A2 и RCP8.5 (наиболее интенсивное среднеглобальное потепление).

Сток Волги в условиях сценарного потепления климата

Годовой сток. Рассчитанное на модели месячного водного баланса возможное изменение го-

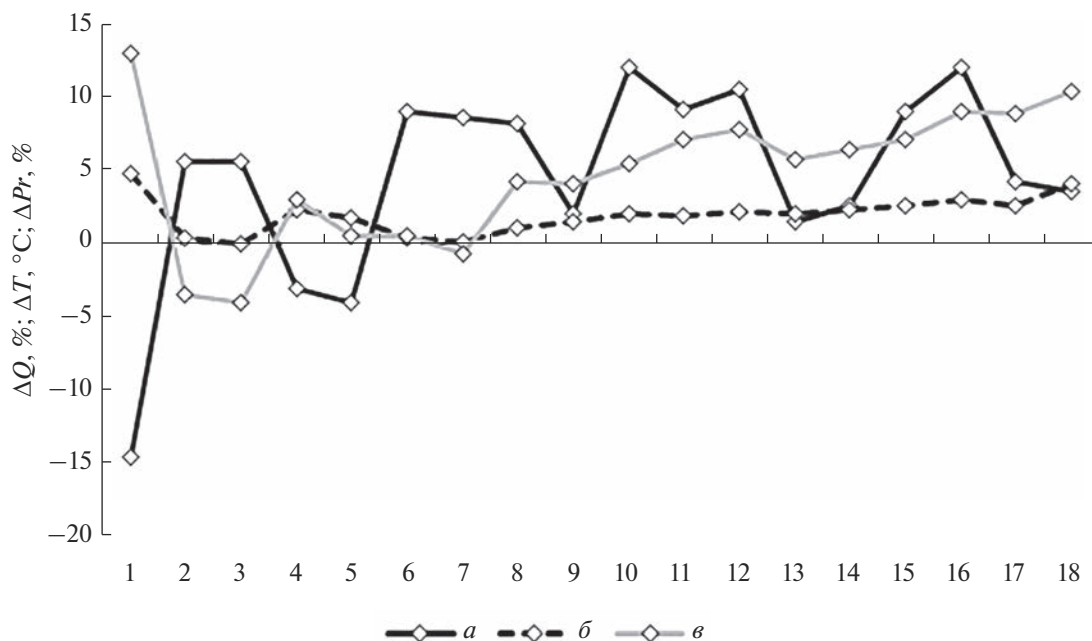


Рис. 8. Изменения (по сравнению с базовым периодом) годового стока (ΔQ , %), температуры воздуха (ΔT , °C) и атмосферных осадков (ΔPr , %) в бассейне Волги у Волгограда в теплые эпохи. *a* — сток воды (ΔQ , %), *б* — температура воздуха (ΔT , °C), *в* — атмосферные осадки (ΔPr , %). 1 — микулинское межледниковье (метод палеоклиматической реконструкции на основе ископаемой пыльцы растений), 2 — бореальное потепление (глобальная климатическая модель MSU), 3 — атлантический оптимум голоцена (глобальная климатическая модель MSU), 4 — атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик увеличены на статистическую ошибку расчетов), 5 — атлантический оптимум голоцена (аномалии палеоклиматических характеристик уменьшены на статистическую ошибку расчетов), 6 — атлантический оптимум голоцена (осредненные палеоклиматические оценки, полученные на ансамбле глобальных климатических моделей программы RMP-II), 7 — субатлантическое потепление (глобальная климатическая модель MSU), 8 — современное потепление (1981–2020 гг.); осредненные климатические сценарии, полученные на ансамбле глобальных климатических моделей программ: 9 — CMIP3_B1_2011-2039, 10 — CMIP3_A2_2011-2039, 11 — CMIP5_RCP2.6_2011-2039, 12 — CMIP5_RCP8.5_2011-2039, 13 — CMIP5_RCP2.6_2011-2039_ББ, 14 — CMIP5_RCP8.5_2011-2039_ББ, 15 — CMIP3_B1_2040-2069, 16 — CMIP3_A2_2040-2069, 17 — CMIP5_RCP2.6_2040-2069_ББ, 18 — CMIP5_RCP8.5_2040-2069_ББ.

дового стока (рис. 7г) в указанных сценарных климатических условиях в 2011–2039 гг. составило 2–12% (по климатическим сценариям программ CMIP3 и CMIP5), в 2040–2069 гг. — 9–12% (по климатическим сценариям программы CMIP3). Наши расчеты, проведенные на основе уравнения среднего многолетнего водного баланса и среднеансамблевых данных о сценарных изменениях атмосферных осадков и испарения, полученных в рамках программы CMIP5, показывают, что возможные изменения годового стока Волги в этих сценарных условиях менее заметны, чем приведенные выше. Так, в 2011–2039 гг. сток Волги может быть выше современного на 1.4–2.6%, в 2040–2069 гг. — на 3.5–4.2%.

Гидрографы стока. Волна половодья для условий рассмотренных климатических сценариев может компактно смещаться на месяц раньше при одновременном существенном увеличении

стока в месяц с наибольшим в период половодья стоком (рис. 6в).

Распределение стока по гидрологическим сезонам года. В сценарных условиях первой трети (2011–2039 гг.) и середины текущего века (2040–2069 гг.), вероятно, сток основных гидрологических сезонов года будет выше современного (кроме летне-осеннего стока, если исходить из климатических сценариев CMIP5 в 2011–2039 гг.). При этом в середине века их изменения могут быть более заметны (см. рис. 7г). Сток половодья в 2011–2039 гг. может увеличиться на 4–17%, зимний сток — на 6–97%, а летне-осенний (при сценариях CMIP3) — на 12–19% или уменьшиться (при реализации сценариев CMIP5) на 6.1–8.3%. В середине века (2040–2069 гг., сценарии CMIP3) сток половодья, вероятно, будет выше современного на 12–14%, зимний — на 22–35%, а летне-осенний — на 17%.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЙ ГОДОВОГО И СЕЗОННОГО СТОКА ВОЛГИ В ТЕПЛЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЭПОХИ ПРОШЛОГО, НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО

Отметим, что все рассмотренные теплые эпохи характеризовались положительными аномалиями годовой температуры воздуха относительно современных условий (базового периода), также как и аномалии годовых сумм атмосферных осадков за исключением бореального и субатлантического потепления и атлантического оптимума голоцена, рассчитанных на глобальной климатической модели MSU (Кислов, 1993). Наибольшими аномалиями годовой температуры воздуха характеризовались оптимумы микулинского межледниковья и голоцена (рассчитанные на основе ископаемой пыльцы растений) и сценарные условия глобального антропогенного потепления, а годовой суммой атмосферных осадков микулинское межледниковье и рассмотренные временные срезы глобального потепления текущего столетия (рис. 8).

Годовой сток Волги, рассчитанный на ММВБ для условий теплых эпох микулинского межледниковья и атлантического оптимума голоцена (если исходить из палеоклиматических реконструкций, основанных на палинологических методах), был ниже современного (см. рис. 8). Тогда как, согласно среднеансамблевым модельным палеоклиматическим реконструкциям программы PMIP-II и глобальной климатической модели MSU, в условиях теплых эпох голоцена (атлантический оптимум голоцена, бореальное и субатлантическое потепление) годовой сток Волги был выше современного. И при сценарном антропогенном потеплении он также может быть выше современного особенно заметно в середине текущего века. Отметим, что изменения годового стока, полученные на основе среднеансамблевых модельных сценариев годового испарения и годовых сумм атмосферных осадков и уравнения водного баланса, существенно ниже оценок, полученных на ММВБ. И при современном глобальном потеплении годовой сток Волги также заметно превышает сток базового периода.

При этом в условиях потепления в период инструментальных наблюдений сток всех сезонов превышал сток базового периода, так же, как и в теплые эпохи голоцена (если основываться на модельных палеоклиматических реконструкциях). И в сценарных климатических условиях текущего столетия сток всех гидрологических сезонов (за рядом исключений, см. рис. 7), так же, как и годовой сток, был выше базового. Но при современном потеплении сток половодья практически не изменялся, в то время как в указанных выше как сценарных условиях, так и в теплых геологических эпохах аномалии стока половодья были

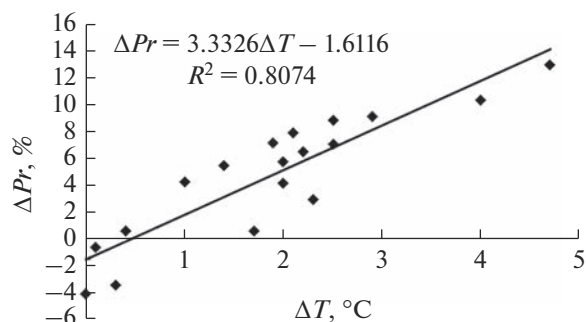


Рис. 9. Корреляция отклонений годовых сумм атмосферных осадков (ΔPr , %) и среднегодовой температуры воздуха (ΔT , °C) в бассейне Волги у Волгограда от их значений для базового периода в условиях теплых эпох геологического прошлого, инструментального периода и сценарных климатических изменений в XXI в.

весьма заметными. В сценарных условиях увеличение как сезонного, так и годового стока характеризуется, как правило, сходным масштабом. При этом в условиях модельных палеоклиматических реконструкций наибольшие изменения происходили с годовым стоком и стоком половодья, тогда как сток межлетних сезонов изменялся существенно менее заметно. А вот в условиях атлантического оптимума голоцена (климатические условия которого были реконструированы на основе палинологического метода) наибольшие изменения затрагивали сток межлетних сезонов. Тогда как в микулинское межледниковье наиболее заметные изменения (разного знака) коснулись стока половодья, зимнего, а также годового стока.

Несмотря на то, что были использованы данные об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков, полученные на основе многолетних рядов наблюдений, палеоклиматических реконструкций, исходящих из модельных и традиционных подходов, а также различных методов обобщения сценарных изменений, выявляется достаточно тесная корреляция между аномалиями их изменений во все рассмотренные теплые климатические эпохи (рис. 9). В то же время сколько-нибудь тесной корреляции между аномалиями годового стока с аномалиями годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков не обнаруживается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены сходства и различия климатических условий (температуры воздуха и атмосферных осадков), годового и сезонного стока, а также гидрографов стока Волги у Волгограда в эпохи глобального потепления геологического прошлого (оптимум микулинского межледниковья, атлантический оптимум, бореальное и субатланти-

ческое потепление голоцена,), периода потепления инструментального периода наблюдений (начиная с 1981 г.) и сценарного глобального потепления в XXI в.

Изменения стока геологического прошлого и сценарного будущего были оценены на основе модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН, и уравнения среднего многолетнего водного баланса. В качестве климатических условий для оценки изменений стока были использованы результаты палеоклиматических реконструкций, основанные на реконструкциях растительности по данным спорово-пыльцевого анализа и результатах расчетов, выполненных на ансамбле глобальных климатических моделей программы RMIР-II, а также результаты оценки изменений климата в XXI в. при условии реализации сценариев антропогенного глобального потепления, полученных в рамках реализации программ МГЭИК/ІРСС СМІР3 и СМІР5. Современные многолетние изменения стока Волги проанализированы на основе методов анализа долговременных контрастных фаз его восстановленных значений (с исключенными антропогенными изменениями).

Наибольшими аномалиями годовой температуры воздуха в бассейне Волги характеризовались оптимумы микулинского межледникового и голоцена (рассчитанные на основе ископаемой пыльцы растений) и сценарные условия глобального антропогенного потепления, а изменениями годовой суммой атмосферных осадков микулинское межледниковье и рассмотренные временные срезы глобального потепления текущего столетия.

Годовой сток Волги в условиях теплых эпох микулинского межледникового и атлантического оптимума голоцена (если исходить из палеоклиматических реконструкций, основанных на палеонтологических методах) был ниже современного. Тогда как согласно модельным палеоклиматическим реконструкциям и сценариям в условиях теплых эпох голоцена и при сценарном антропогенном потеплении (особенно в середине текущего столетия), а также в условиях современного глобального потепления годовой сток Волги оказывается выше, чем в базовый период.

Выявлены значительные различия в изменениях сезонного распределения стока Волги между всеми рассмотренными теплыми климатическими эпохами. При этом изменения сезонного распределения при современном глобальном потеплении во многом сходны (за исключением стока половодья) с теми, что можно ожидать в сценарных условиях, а также могли наблюдаться (с рядом исключений) в теплые эпохи голоцена, если основываться на модельных палеоклиматических реконструкциях. При этом в условиях модельных палеоклиматических реконструкций

наибольшие изменения происходили с годовым стоком и стоком половодья, тогда как сток межженных сезонов изменялся существенно менее заметно. А вот в условиях атлантического оптимума голоцена (климатические условия которого были реконструированы на основе ископаемой пыльцы растений) наибольшие изменения затрагивали сток межженных сезонов. Тогда как в микулинское межледниковье наиболее заметные изменения (разного знака) коснулись стока половодья, зимнего, а также годового стока.

Несмотря на то, что были использованы весьма разнородные данные об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков, полученные на основе многолетних рядов наблюдений, палеоклиматических реконструкций, исходящих из модельных и традиционных подходов, а также различных методов обобщения сценарных изменений, выявлена достаточно тесная корреляция между аномалиями их изменений во все рассмотренные теплые эпохи.

Региональная граница начала современного глобального потепления в бассейне Волги, определенная как начало долговременных фаз повышенной годовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков, осредненных по ее бассейну, относится (в зависимости от используемых данных) соответственно к 1978–1987 гг. и к 1975 г. В этот период наблюдалась фаза повышенного стока обоих межженных сезонов, фазы повышенного и пониженного стока половодья (примерно одинаковой продолжительности) и годового стока, фаза повышенного стока которого была существенно продолжительнее. Разница в стоке контрастных фаз для годового и сезонного стока составляла 16, 17, 19% для годового стока, стока половодья, летне-осеннего сезона и 37% для зимнего стока.

В период инструментальных наблюдений (особенно начиная с 1920-х годов) выявлена высокая степень синхронности долговременных фаз повышенного/пониженного стока Волги с соответствующими фазами индекса Северо-Атлантического колебания и периодов повышения и понижения годовых уровней Каспийского моря.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

FUNDING

The study was prepared within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев В.Г. Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчетах стока // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. Ленинград: Гидрометеиздат, 1959. Т. II. С. 3–49.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 72–81.
- Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. Вып. 145. Гидрологические изменения. 2018. С. 206–218.
- Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
- Величко А.А., Климанов В.А., Беляев А.В. Реконструкция стока Волги и водного баланса Каспия в оптимумы микулинского межледниковья и голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр. 1988. № 1. С. 27–37.
- Величко А.А., Беляев А.В., Георгиади А.Г., Климанов В.А. Реконструкция климатических условий и речного стока северного полушария в течение микулинского межледниковья и голоцена // Водные ресурсы. 1992. № 4. С. 34–42.
- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический ин-т, 2008. 600 с.
- Георгиади А.Г. Реконструкция речного стока на основе исторических и косвенных данных // Водные ресурсы. 1992. № 4. С. 106–114.
- Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Долговременные фазы многолетних изменений стока крупнейших рек водосбора Северного Ледовитого океана // Вопросы географии. Вып. 142. География полярных регионов. 2016. С. 178–195.
- Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Долговременные изменения стока крупнейших Сибирских рек // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 5. С. 70–81. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-70-81>
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Масштабы гидрологических изменений в бассейне реки Волги при антропогенном потеплении климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 2. С. 72–79.
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Особенности гидрологических аномалий в бассейне р. Волги в теплые эпохи голоцена // Изв. РАН. Сер. геогр. 2006. № 6. С. 112–120.
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Речной сток в бассейнах крупнейших рек южного склона Русской равнины в позднеатлантический оптимум // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 6. С. 113–124.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Изд-во “Макс Пресс”, 2014. 214 с.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Милюкова И.П. О вкладе климатических и антропогенных факторов в изменения стока крупных рек Русской равнины и Сибири // ДАН. 2019. Т. 488. № 5. С. 539–544. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524885539-544>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Бородин О.О. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
- Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Оценка влияния возможных климатических изменений на гидрологический режим и водные ресурсы рек бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89–99.
- Георгиевский М.В., Голованов О.Ф. Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5 // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. Вып. 2. С. 206–218.
- Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
- Кислов А.В. Математическое моделирование климата оптимума голоцена // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 2. № 7. С. 705–713.
- Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколичина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов С.М., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс Пресс, 2008. 290 с.
- Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
- Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли / ред. В.И. Корзун. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 637 с.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд. Российской академии наук, 2019. 300 с.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.К. Оценки возможных изменений регионального гидрологического режима в XXI веке, основанные на глобальных климатических моделях // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2003. № 39. С. 130–144.
- Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен-голоцен. М.: ГЕОС, 2009. 120 с.
- Панин Г.Н., Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В., Выручалкина Т.Ю. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2 (26). С. 35–52.
- Попова В.В., Георгиади А.Г. Спектральные оценки связи изменчивости стока Волги и Североатлантического колебания в 1882–2007 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 2. С. 73–85. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59>
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Снижение стока рек равнин Северной Евразии в оптимум голоцена // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. № 1. С. 1–14.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Геоморфологические подходы к оценке величины речного сто-

- ка в геологическом прошлом (ст. 5. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами) // Геоморфология. 2019. № 1. С. 66–79.
- Шерстюков Б.Г. Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2021. 221 с.
- Шумм С. Палеогидрология четвертичного периода // Четвертичный период в США. М.: Изд-во “Мир”, 1968. Т. 1. С. 541–559.
- Ackerley D., Reeves J., Barr C., Bostock H., Fitzsimmons K., Fletcher M.-S., Gouramanis C., McGregor H., Mooney S., Phipps S.J., Tibby J., Tyler J. Evaluation of PMIP2 and PMIP3 simulations of mid-Holocene climate in the Indo-Pacific, Australasian and Southern Ocean regions // *Clim. Past*. 2017. Vol. 13. P. 1661–1684. <https://doi.org/10.5194/cp-13-1661-2017>
- Arc Atlas: Our Earth. Environmental Systems Research Institute, Inc. and DATA+ All Rights Reserved. 1996.
- Atlas of Paleoclimates and Paleoenvironments of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene-Holocene. Stuttgart: Gustav Fesher Verlag, Budapest, 1992.
- Borisova O., Sidorchuk A., Panin A. Palaeohydrology of the Seim River basin, Mid-Russian Upland, based on palaeochannel morphology and palynological data // *Catena*. 2006. Vol. 66. № 1–2. P. 53–73.
- Caesar L., McCarthy G.D., Thornalley D.J.R., Cahill N., Rahmstorf S. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last Millennium // *Nature Geoscience*. 2021. Vol. 14. P. 118–120. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>
- Daily and Sub-daily Precipitation for the Former USSR. Ver. 1.0. Asheville, USA: National Climatic Data Center, 2005.
- Georgiadi A.G. Reconstruction of river runoff based on natural proxy data // *Climatic change in the historical and instrumental period*. Brno: Mazaric Univ., 1990. P. 134–137.
- Georgiadi A.G., Danilenko A.O. Northern Dvina River: Long Periods of Increased and Decreased Water and Ionic Runoff in the 19th–21st Centuries // *Geography and Natural Resources*. 2022. № 2. P. 149–155. <https://doi.org/10.1134/S1875372822020032>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora // *Environ. Res. Lett.* 2022. Vol. 17. P. 085002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // *Polarforschung*. 2018. Vol. 87 (2). P. 167–176. <https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin // *Water Res.* 2021. Vol. 47. № 6. P. 913–923. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Assessing the effect of climatic and anthropogenic factors on the annual runoff of large rivers in European Russia and Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bristol: IOP Publ., 2019. Vol. 38. P. 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012027>
- Jones P.D., Jónsson T., Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland // *Int. J. Climatol.* 1997. Vol. 17. P. 1433–1450.
- Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Taylor K.E. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research // *Bull. of the American Meteorological Society*. 2007. № 88. P. 1383–1394.
- Panin A., Matlakhova E. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications // *Catena*. 2015. Vol. 130. P. 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016>
- Panin A.V., Nefedov V.S. Analysis of Variations in the Regime of Rivers and Lakes in the Upper Volga and Upper Zapadnaya Dvina Based on Archaeological-Geomorphological Data // *Water Res.* 2010. Vol. 37. № 1. P. 16–32.
- Shiklomanov I.A., Georgievsky V.Yu., Shalygin A.L. River runoff as a major factor of long-term Caspian level fluctuations. Proceedings of the International Scientific Conference “Climate and Water Balance Changes in the Caspian Region” (19–20 October 2010, Astrakhan). Astrakhan, 2011. P. 9–15.

The Volga River Water Runoff in Warm Epochs

A. G. Georgiadi¹, * and I. P. Milyukova¹

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: georgiadi@igras.ru

Similarities and differences in climatic conditions (air temperature and precipitation), annual and seasonal runoff, as well as hydrographs of the Volga River runoff near Volgograd in the epochs of global warming in the geological past, the period of modern warming (since 1981), and the scenario global warming in the 21st century are revealed. Changes in the runoff of the geological past and the scenario future were estimated on the basis of the monthly water balance model developed at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences and the equation of the average long-term water balance. The results of traditional and model paleoclimatic reconstructions and climate scenarios of global warming in the 21st century were used as climatic conditions for assessing changes in runoff. Modern long-term changes in the Volga River runoff are analyzed on the basis of ideas about long-lasting contrasting phases. As a result of the analysis, it is shown that

the annual Volga River runoff in the conditions of the warm epochs of the Mikulinsky interglacial and the Atlantic optimum of the Holocene (based on traditional paleoclimatic reconstructions) was lower than the modern one. Whereas, according to model paleoclimatic reconstructions of the warm epochs of the Holocene, climatic scenarios of anthropogenic warming, as well as in the conditions of modern global warming, the annual runoff of the Volga River is higher than in the base period. Significant differences in the changes in the seasonal distribution of the Volga River runoff between all the considered warm epochs were revealed. The different nature of these changes is characteristic of the warm epochs of the paleoepochs and in the conditions of scenario climatic changes in the 21st century. At the same time, changes in the seasonal distribution during modern global warming are similar to those that can be expected with scenario warming in the first third and middle of the current century (except snowmelt flood runoff). A close correlation was revealed between the anomalies of changes in the annual air temperature and the annual amount of precipitation in all the considered warm epochs. During the period of instrumental observations, the long-term phases of the increased or decreased water runoff of the Volga River are synchronous with the corresponding phases of the index of the North Atlantic oscillation and the periods of increase and decrease in the annual levels of the Caspian Sea.

Keywords: global warming, warm geological epochs, scenario warming, changes in annual and seasonal runoff, long phases, methods for assessing runoff changes

REFERENCES

- Ackerley D., Reeves J., Barr C., Bostock H., Fitzsimmons K., Fletcher M-S., Gouramanis C., McGregor H., Mooney S., Phipps S.J., Tibby J., Tyler J. Evaluation of PMIP2 and PMIP3 simulations of mid-Holocene climate in the Indo-Pacific, Australasian and Southern Ocean regions. *Clim. Past*, 2017, vol. 13, pp. 1661–1684. <https://doi.org/10.5194/cp-13-1661-2017>
- Andreyanov V.G. Cyclical fluctuations of annual runoff, their changes in the territory and accounting for runoff calculations. *Tr. III Vsesoyuz. Gidrol. S'ezda*. Vol. II. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1959, pp. 3–49. (In Russ.).
- Arc Atlas: Our Earth. Environmental Systems Research Institute, DATA+, 1996.
- Atlas of Paleoclimates and Paleoenvironments of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene-Holocene. Stuttgart: Gustav Fesher Verlag, Budapest, 1992.
- Bolgov M.V., Filippova I.A., Osipova N.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D. Modern features of the hydrological regime of the rivers of the Volga basin. In *Vopr. Geografii, Tom 145* [Problems of Geography. Vol. 145], 2018, pp. 206–218. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Filippova I.A. Bayesian prediction of minimum river runoff under nonstationary conditions of future climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, pp. 497–503. <https://doi.org/10.3103/S1068373916070074>
- Borisova O., Sidorchuk A., Panin A. Palaeohydrology of the Seim River basin, Mid-Russian Upland, based on palaeochannel morphology and palynological data. *Catena*, 2006, vol. 66, no. 1–2, pp. 53–73.
- Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* [Climate in the Past and Future]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1980. 352 p.
- Caesar L., McCarthy G.D., Thornalley D.J.R., Cahill N., Rahmstorf S. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last Millennium. *Nature Geosci.*, 2021, vol. 14, pp. 118–120. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>
- Daily and Sub-daily Precipitation for the Former USSR. Version 1.0*. Asheville, USA: National Climatic Data Center, 2005.
- Georgiadi A.G. Reconstruction of river runoff based on natural proxy data. In *Climatic change in the historical and instrumental period*. Brno: Mazaric Univ., 1990, pp. 134–137.
- Georgiadi A.G. Reconstruction of river flow based on historical and indirect data. *Vodn. Resur.*, 1992, no. 4, pp. 106–114. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Danilenko A.O. Northern Dvina River: long periods of increased and decreased water and ionic runoff in the 19th–21st centuries. *Geogr. Nat. Resour.*, 2022, vol. 43, no. 2, pp. 149–155. <https://doi.org/10.1134/S1875372822020032>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora. *Environ. Res. Lett.*, 2022, vol. 17, no. 085002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Long phases of long-term changes in the flow of the largest rivers of the Arctic Ocean catchment. In *Vopr. Geografii. Tom 142* [Problems of Geography. Vol. 142], 2016, pp. 178–195. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Long-term changes in the flow of the largest Siberian rivers. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 5, pp. 70–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-70-81>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. The scale of hydrological changes in the Volga River basin under anthropogenic climate warming. *Meteorol. Hydrol.*, 2002, no. 2, pp. 72–79. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Features of hydrological anomalies in the Volga River basin in the warm epochs of the Holocene. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2006, no. 6, pp. 112–120. (In Russ.).

- Georgiadi A.G., Milyukova I.P. River flow in the basins of the largest rivers of the southern slope the Russian plain in the Late Atlantic optimum. *Izv. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2007, no. 6, pp. 113–124. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of the largest Siberian rivers. *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, pp. 167–176.
<https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin. *Water Resour.*, 2021, vol. 47, no. 6, pp. 913–923.
<https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Contribution of Climatic and Anthropogenic Factors to Changes in the Flow of Large Rivers of the Russian Plain and Siberia. *Dokl. Earth Sci.*, 2019, vol. 488, pp. 1211–1216.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X19100106>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Assessing the effect of climatic and anthropogenic factors on the annual runoff of large rivers in European Russia and Siberia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 38, no. 012027.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012027>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kislov A.V., Anisimov O.A., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Borodin O.O. *Stsenarnaya otsenka veroyatnykh izmenenii rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 1. Bassein reki Leny* [Scenario Assessment of Probable Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers of Russia. Part 1. Lena River Basin]. Moscow: “Max Press” Publ., 2011. 179 p.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsenarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: “Max Press” Publ., 2014. 214 p.
- Georgievsky M.V., Golovanov O.F. Forecast estimates of changes in water resources of the largest rivers of the Russian Federation based on data on river flow of the CMIP5 project. *Vestn. St. Petersburg Gos. Univ. Nauki Zemle*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 206–218. (In Russ.).
- Georgievsky V.Yu., Yezhov A.V., Shalygin A.L., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.B. Assessment of the impact of possible climate changes on the hydrological regime and water resources of the rivers of the former USSR. *Meteorol. Hydrol.*, 1996, no. 11, pp. 89–99. (In Russ.).
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sushy s atmosferoi* [Modeling of Heat and Moisture Exchange of the Land Surface with the Atmosphere]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 327 p.
- Jones P.D., Jónsson T., Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.*, 1997, vol. 17, pp. 1433–1450.
- Kislov A.V. Mathematical modeling of the Holocene optimum climate. *Izv. Atmosf. Ocean. Phys.*, 1993, vol. 2, no. 7, pp. 705–713. (In Russ.).
- Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malkhazova S.M., Sokolikhina N.N., Surkova G.V., Toropov S.M., Chernyshev A.V., Chumachenko A.N. *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh potepleniya XXI veka* [Forecast of Climatic Resource Availability of the East European Plain in the Conditions of Warming of the 21st Century]. Moscow: “Max Press” Publ., 2008. 290 p.
- Lvovich M.I. *Mirovye vodnye resursy i ikh budushchee* [World Water Resources and Their Future]. Moscow: Mysl' Publ., 1974. 448 p.
- Meehl G.A., Covey C., Delworth T., Latif M., McAvaney B., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Taylor K.E. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2007, no. 88, pp. 1383–1394.
- Mirovoi vodnyi balans i vodnye resursy Zemli* [World Water Balance and Water Resources of the Earth]. Korzun V.I., Ed. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 637 p.
- Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.K. Estimates of possible changes in the regional hydrological regime in the 21st century based on global climate models. *Izv. Atmosf. Ocean. Phys.*, 2003, no. 39, pp. 130–144. (In Russ.).
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseinov* [Models of Flow Formation in the Problems of Hydrology of River Basins]. Moscow: Russ. Acad. Sci. Publ., 2019. 300 p.
- Paleoklimaty i paleolandshafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnii pleistotsen-golotsen* [Paleoclimates and Paleolandscapes of the Extratropical Space of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene-Holocene]. Moscow: GEOS Publ., 2009. 120 p.
- Panin A., Matlakhova E. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. *Catena*, 2015, vol. 130, pp. 46–61.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016>
- Panin G.N., Diansky N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V., Vyruchalkina T.Yu. Assessment of climate change in the Arctic in the 21st century based on a combined prognostic scenario. *Arktika: Ecol. and Econ.*, 2017, no. 2 (26), pp. 35–52. (In Russ.).
- Panin A.V., Nefedov V.S. Analysis of Variations in the Regime of Rivers and Lakes in the Upper Volga and Upper Zapadnaya Dvina Based on Archaeological-Geomorphological Data. *Water Resour.*, 2010, vol. 37, no. 1, pp. 16–32.
- Popova V.V., Georgiadi A.G. Spectral estimates of the relationship between the variability of the Volga runoff and the North Atlantic oscillation in 1882–2007. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 2, pp. 73–85. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59>

- Sherstyukov B.G. *Kolebatel'naya sistema klimata, rezonansy, dal'nie svyazi, prognozy* [Vibrational Climate System, Resonances, Long-Distance Communications, Forecasts]. Obninsk: RIHMI-WDC Publ., 2021. 221 p.
- Shiklomanov I.A., Georgievski V.Yu., Shalygin A.L. River runoff as a major factor of long-term Caspian level fluctuations. In *Proc. Int. Sci. Conf. "Climate and Water Balance Changes in the Caspian Region" (19–20 October 2010, Astrakhan)*. Astrakhan, 2011, pp. 9–15.
- Shumm S. Paleohydrology of the Quaternary period. In *Chetvertichnyi period v SShA. Tom I* [The Quaternary Period in the USA. Vol. I]. Moscow: Mir Publ., 1968, pp. 541–559. (In Russ.).
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. River runoff decrease in North-Eurasian plains during the Holocene optimum. *Water Resour.*, 2012, vol. 39, no. 1, pp. 69–81.
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Borisova O.K. Geomorphological approaches to assessing the magnitude of river runoff in the geological past (Article 5. Comparative analysis of the results obtained by different methods). *Geomorph.*, 2019, no. 1, pp. 66–79. (In Russ.).
- Velichko A.A., Belyaev A.V., Georgiadi A.G., Klimanov V.A. Reconstruction of climatic conditions and river flow in the Northern Hemisphere during the Mikulin interglacial and Holocene. *Vodn. Resur.*, 1992, no. 4, pp. 34–42. (In Russ.).
- Velichko A.A., Klimanov V.A., Belyaev A.V. Reconstruction of the Volga River flow and water balance the Caspian Sea in the optima of the Mikulino interglacial and Holocene. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1988, no. 1, pp. 27–37. (In Russ.).
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: Gos. Hydrol. Inst. Publ., 2008. 600 p.

ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА ВОЛГИ

УДК 556.01

О СООТНОШЕНИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ В ИЗМЕНЕНИИ СТОКА ВОЛГИ

© 2023 г. Н. И. Коронкевич^а, *, А. Г. Георгиади^а, Е. А. Барабанова^а,
Е. А. Кашутина^а, И. П. Милукова^а

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: koronkevich@igras.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 14.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Расчет вклада антропогенных и климатических факторов в изменение годового и сезонного стока Волги в створе Волгограда за периоды существенного антропогенного воздействия (1930–2020 и 2011–2020 гг.) по сравнению с условно-естественным периодом формирования стока (1879–1929 гг.) проведен в двух вариантах (двумя методами). Первый вариант базируется на сопоставлении антропогенного изменения стока, обусловленного влиянием водохранилищ и безвозвратным расходом при водопотреблении, с общим изменением стока за сравниваемые периоды. Во втором варианте с общим изменением стока сопоставляется восстанавливаемый условно-естественный сток в периоды существенного антропогенного воздействия, рассчитываемый по связи стока Волги со стоком рек-индикаторов климатических условий. При этом допускается, что климатические изменения в основном естественного происхождения. Выявлено, что влияние антропогенных и климатических факторов в происходящем общем уменьшении годового стока Волги по сравнению с условно-естественным периодом однонаправленно и сопоставимо. Оба варианта расчета дают близкие значения соотношения антропогенных и климатических факторов в общем изменении стока в 1930–2020 гг. Более существенны различия в расчетах на 2011–2020 гг. и в оценке сезонных изменений, наиболее заметно проявляющихся в весеннее половодье и зимой. В изменении стока весеннего половодья и зимой антропогенные и климатические факторы действуют в одном направлении, уменьшая сток весеннего половодья и увеличивая его зимой преимущественно за счет антропогенных факторов. Имеющиеся различия в соотношении факторов во многом можно объяснить ландшафтными преобразованиями в бассейне Волги, в том числе в бассейнах рек-индикаторов климатических условий, влияние которых на сток не учитывается в водохозяйственной статистике, хотя в последние десятилетия различные виды хозяйственной деятельности на водосборах в значительной степени компенсируют друг друга во влиянии на сток. Доля антропогенных факторов в изменении стока Волги меняется в широких пределах в зависимости от характера использования водных ресурсов, которое не всегда бывает рациональным. Неэкономное использование водных ресурсов увеличивает долю антропогенных факторов в общем изменении речного стока.

Ключевые слова: годовые и сезонные изменения речного стока, антропогенные и климатические факторы, варианты и методы расчета

DOI: 10.31857/S2587556623060092, EDN: DSYSHO

ВВЕДЕНИЕ

Нет необходимости говорить о чрезвычайно важной роли бассейна Волги и самой Волги, их состояния в жизни нашей страны. Но это состояние в последние десятилетия вызывает тревогу из-за загрязнения природных вод и неблагоприятных изменений в количестве водных ресурсов и режиме их внутригодового распределения, несмотря на принимаемые меры, в том числе в рамках государственной программы “Оздоровление Волги”. В этих условиях представляется очень актуальным выявить причины сложившейся ситуа-

ции, роль климатических и антропогенных факторов в ее формировании.

Сток Волги весьма динамичен. Эта динамика обусловлена влиянием как климатических, так и антропогенных воздействий. Сложность выявления соотношения их влияния заключается в том, что климатические и антропогенные изменения речного стока тесно взаимосвязаны и часто воздействуют на сток не непосредственно, а косвенно — через рельеф, почву, биоту. Поэтому невозможно абсолютно точно разделить вклад климатических и антропогенных факторов в формирование и изменение речного стока и приходится довольствоваться

ся относительными оценками. Обычно они представляют собой величину отклонений стока от неких базовых значений (например, от его нормы, среднего многолетнего стока или стока какого-либо другого периода), рассчитываемых разными методами.

Оценке влияния на сток Волги антропогенных и особенно климатических факторов в связи с резко возросшим в последние годы интересом к теме изменения климата посвящена обширная литература. Но, как правило, большинство авторов оценивало роль этих факторов изолированно, причем не ставя цель выявить соотношение их вклада в общее изменение стока. Только в последнее время роли климатических факторов в изменение стока Волги посвящены работы Н.И. Алексеевского и др. (2013), М.В. Болгова с соавторами (2014), С.А. Лаврова, И.Л. Калюжного (2016), В.В. Поповой и др. (2019). Обзор роли климатических факторов в изменении стока рек России, в том числе Волги, выполнен А.Н. Гельфаном с соавторами (2021). Широкую известность получили работы по оценке антропогенных изменений стока рек СССР и России, включая бассейн Волги, выполненные в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) И.А. Шикломановым (1979) и под его руководством (Водные ресурсы России ..., 2008; и др.). Авторы данной статьи также занимались этими вопросами (Антропогенные ..., 2003; Георгиади и др., 2014, 2019; Коронкевич, 1990). Зная общее изменение стока и роль одного из факторов (антропогенного или климатического), не сложно определить и вклад этих факторов в общее изменение стока. Однако одной из первых работ по целенаправленному выявлению соотношения климатических и антропогенных факторов в изменение стока Волги стала монография И.С. Зайцевой (1990). Авторы данной статьи также предпринимали подобные расчеты (Георгиади и др., 2014, 2019). В последней из указанных работ была выполнена оценка указанных соотношений до 2014 г. Цель данной статьи – выявить соотношение вклада антропогенных и климатических факторов в изменение стока Волги у Волгограда вплоть до 2020 г. и отдельно за 2011–2020 гг. по сравнению с условно-естественным периодом (до 1930 г.).

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основных исходных материалов использованы данные Росгидромета (Ресурсы ..., 1982–2020), водохозяйственной статистики (Водные ..., 2007–2019; Государственный ..., 2019), а также названных выше литературных источников. Расчет соотношения климатических и антропогенных факторов начинается с определения периодов, отличающихся по характеру формиро-

вания стока, далее сопоставляется сток за эти периоды. Для Волги в створе Волгограда в качестве базового принят период 1879–1929 гг., а за период существенного антропогенного воздействия – 1930–2020 гг. Особо выделено последнее десятилетие (2011–2020 гг.).

На рис. 1 показана динамика изменения стока Волги у Волгограда с 1879 по 2020 г. и средние его значения за характерные периоды.

Для выявления вклада климатических и антропогенных факторов в общее изменение стока применены два независимых подхода, подробно изложенных в работах А.Г. Георгиади и др. (2014, 2019). Один основан на данных водохозяйственной статистики, а также литературных источников о водопотреблении в бассейне Волги, другой – на восстановлении условно-естественного стока. При этом разница восстановленного (условно-естественного) стока для периода интенсивного антропогенного воздействия и стока базового периода характеризует влияние климатических изменений (при допущении, что они не являются следствием деятельности человека), а разница восстановленного (условно-естественного) и фактического (наблюденного) стока периода интенсивного антропогенного воздействия – вклад антропогенного влияния на суммарные изменения стока.

Для восстановления условно-естественного стока использованы корреляционные связи стока Волги и стока рек, водный режим которых относительно слабо изменен антропогенным воздействием и которые служат своеобразными индикаторами климатических условий. В качестве таких рек выбраны Вятка у Кирова, Ока у Калуги, Белая у Бирска. Водосборы этих рек относятся к основной области формирования стока Волги. Отметим, что меженный сток Белой у Бирска все же испытывает влияние небольших водохранилищ, но это, видимо, не оказывает значительного влияния на рассматриваемые нами характеристики восстановленного стока.

Параметры уравнений регрессии (для годового и сезонного стока) оценивались на основе многолетних данных, охватывающих базовый период 1879–1929 гг. Уравнения регрессии для восстановления стока характеризуются достаточно высокими коэффициентами множественной линейной корреляции и вполне приемлемыми ошибками регрессий. Так, коэффициенты множественной линейной корреляции равны или превышают 0.8 (для годового стока 0.85, стока половодья 0.89, летне-осеннего 0.86, зимнего 0.80). Стандартная ошибка регрессии и средняя ошибка аппроксимации (Шалабанов, Роганов, 2008) составляет соответственно для годового стока 9.6 и 7.4%, для стока половодья 8.7 и 7.4%, для летне-осеннего стока 14.1 и 10.3%, для зимнего стока

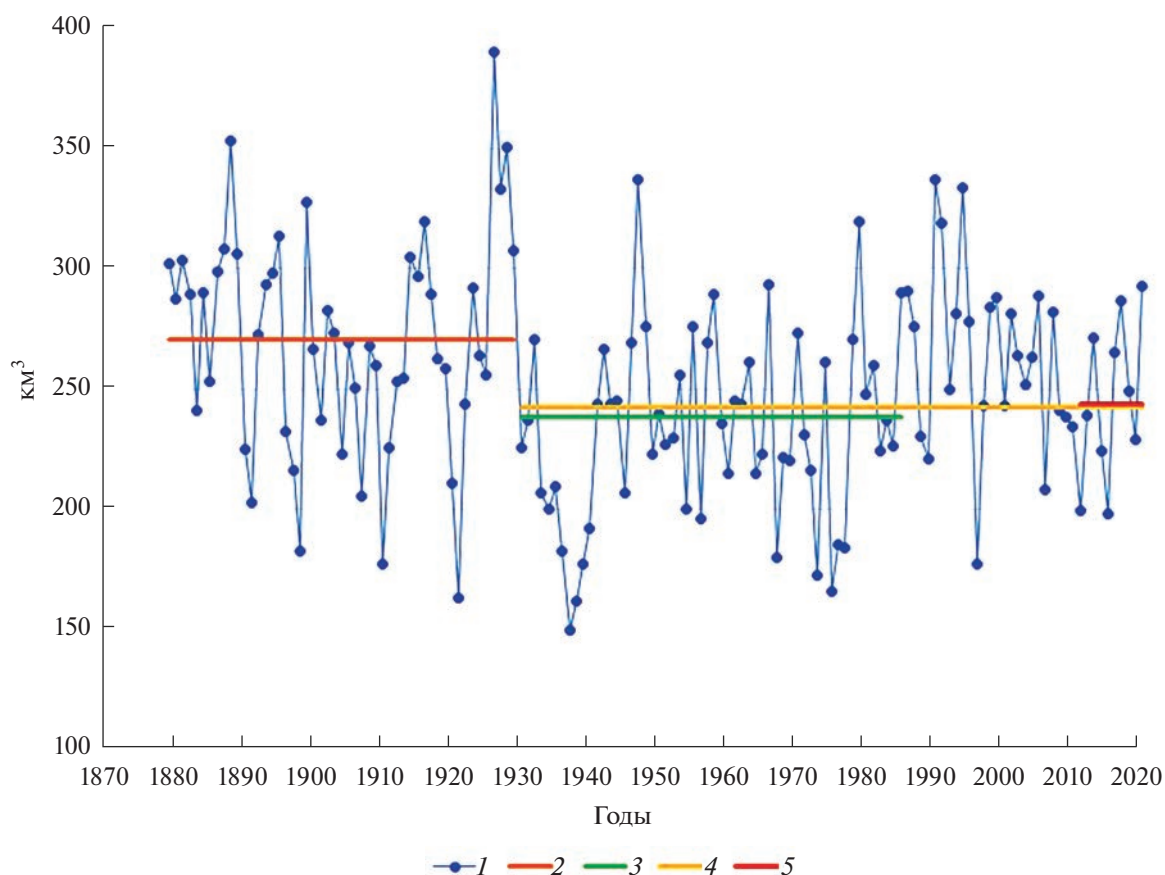


Рис. 1. Динамика стока Волги у Волгограда и средние значения стока за характерные периоды. 1 — фактический сток, 2 — средний условно-естественный сток за базовый период 1879–1929 гг., 3 — норма стока по ГГИ (1930–1980 гг.), 4 — средний измененный сток за 1930–2020 гг., 5 — средний измененный сток за 2011–2020 гг.

21.9 и 16.6%. Точность восстановления стока повышается при увеличении продолжительности периода осреднения, и уже для 10-летнего и более длительных периодов (которые и рассматриваются в статье) она значительно выше, чем для отдельных лет [см., например, (Шикломанов, 1979)]. Отметим, что при этом важно учитывать длительные фазы повышенного и пониженного стока.

Восстанавливать сток можно и по непосредственной связи с метеорологическими элементами. Но получить их данные для всего бассейна Волги или его основной области формирования гораздо сложнее, чем использовать реки-индикаторы климатических условий. Влияние антропогенных факторов на сезонный сток оценено по А.Е. Асарину (1987).

Существуют и другие методы расчета и восстановления стока, в частности в работах ГГИ (Водные ..., 2008), основанные на анализе условий формирования гидрографа стока на отдельных участках. На них мы не будем останавливаться, но далее приведем полученные по ним результаты. Зная общее изменение стока и влияние климатических или антропогенных факторов, не сложно

определить роль других, но использование двух или более независимых методов важно для контроля достоверности полученных результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОБЩЕНИЕ

Как следует из рис. 1, имеет место явное превышение условно-естественного стока Волги в створе Волгограда (в среднем $270.5 \text{ км}^3/\text{год}$) с максимальным стоком в 1926 г. над стоком за другие периоды. Следует отметить и близкую величину стока этих периодов. Так, норма стока за 1930–1980 гг. составляет $238 \text{ км}^3/\text{год}$, а за периоды 1939–2020 и 2011–2020 гг. 242.5 и $245.4 \text{ км}^3/\text{год}$ соответственно.

В табл. 1 показано общее изменение стока за антропогенно измененные периоды с учетом как климатических, так и антропогенных факторов, по сравнению с базовым (условно-естественным) периодом 1879–1929 гг. За период 1930–2020 гг. оно выражается в его уменьшении в среднем на $28 \text{ км}^3/\text{год}$, или на 10.4%, а за 2011–2020 гг. — на $25 \text{ км}^3/\text{год}$ (9.3%). Без учета других факторов,

Таблица 1. Изменение объема годового стока Волги у Волгограда под влиянием суммарного воздействия климатических и антропогенных факторов относительно базового периода

Базовый период		Период существенного антропогенного воздействия		Изменение стока		
период	объем стока, км ³ /год	период	объем стока, км ³ /год	среднее за год		всего, км ³
				км ³ /год	%	
1879–1929	270.5	1930–2020	242.5	–28	–10.4	–2548
		2011–2020	245.4	–25	–9.3	–250

Таблица 2. Изменение годового стока Волги у Волгограда за период существенного антропогенного воздействия, рассчитанное по данным водохозяйственной статистики относительно базового периода, км³

Период	Антропогенные изменения				Климатические изменения	
	влияние водохранилищ (заполнение мертвого объема и дополнительное испарение)	безвозвратное водопотребление	всего	среднее за год	всего	среднее за год
1930–2020	–489	–510	–999	–11	–1549	–17
2011–2020	–65	–59	–124*	–12.4*	–126*	–12.6*

Примечание. * С учетом притока из других бассейнов антропогенное изменение –113 км³, в среднем за год –11.3 км³, а климатическое –137 и 13.7 км³ соответственно.

влияющих на уровень Каспийского моря (изменения атмосферных осадков, выпадающих на акваторию моря, испарения с нее, стока других, кроме Волги, притоков, поступления каспийских вод в залив Кара-Богаз-Гол) это способствовало ежегодному снижению уровня Каспия на 6–9 см.

В табл. 2 дана оценка вклада в эти изменения влияния водохранилищ (заполнение мертвого объема и дополнительные потери на испарение с их акватории) и безвозвратного расхода при водопотреблении на различные хозяйственные нужды.

Второй вариант расчета, основанный на восстановлении условно-естественного стока и его сравнении с фактическим, представлен в табл. 3.

Процентное соотношение изменений годового стока, полученное двумя основными методами, представлено на рис. 2. В итоге по двум вариантам расчета за период 1930–2020 гг. получены близкие оценки вклада климатических и антропогенных факторов в общее изменение стока. По первому варианту расчета соотношение антропо-

генных и климатических факторов составляет соответственно 40 и 60%, по второму – 46.8 и 53.2%. Но за 2011–2020 гг. различия более существенны – на антропогенные факторы приходится по первому варианту 45.2% изменения стока, по второму 20.8% и соответственно на климатические факторы – 54.8 и 79.2%. Имеющиеся различия между двумя вариантами расчетов можно объяснить изменением состояния водосборов как рек-индикаторов, так и самой Волги, влияние которого на сток не учитывается в водохозяйственной статистике. Так, по данным, основанным на воднобалансовых расчетах, опирающихся на результаты наблюдений на стоковых площадках, за период 1931–2005 гг. мероприятия неорошаемого земледелия привели к уменьшению стока Волги на 2.7 км³/год (Георгиади и др., 2014). Вместе с тем в последние десятилетия различные антропогенные воздействия на сток на водосборе в значительной мере взаимокompенсируются (рис. 3).

Таблица 3. Изменения годового стока Волги у Волгограда за период существенного антропогенного воздействия, рассчитанные методами восстановления его условно-естественных значений, км³

Период	Антропогенные изменения		Климатические изменения	
	суммарно за период	среднее за год	суммарно за период	среднее за год
1930–2020	–1192	–13.1	–1356	–14.9
2011–2020	–73	–7.3	–177	–17.7

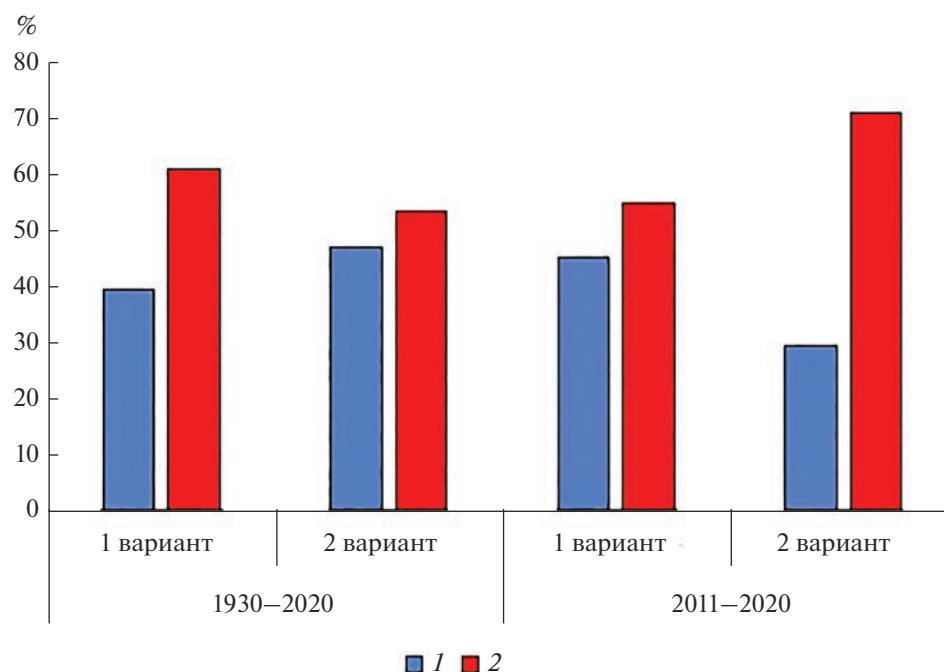


Рис. 2. Сравнение изменений стока, рассчитанного двумя методами. 1 – антропогенные изменения, 2 – климатические изменения.

По данным ГГИ (Водные ресурсы России ..., 2008), общее антропогенное изменение стока Волги в целом в 1985–2005 по сравнению с 1935–1980 гг. оценивалось в 9.5–10 км³/год, что близко к нашим расчетам за 1930–2020 гг., учитывая еще и то, что уменьшение стока Волги ниже Волгограда привело к сокращению площадей затопления в дельте в период весеннего половодья и к уменьшению испарения в размере 1.5 км³/год и соответствующей компенсации для стока. Ежегодный вклад отдельных видов воздействия на годовой сток Волги оценен следующим образом: потери воды на дополнительное испарение с акватории водохранилищ – 6.5 км³, безвозвратный расход при использовании воды на различные хозяйственные нужды – 4.6 км³, влияние агротехнических мероприятий 1.3–1.5 км³, приток воды из других речных бассейнов (Волхова, Дона) – 1.1 км³ и указанное выше уменьшение потерь на испарение в низовьях Волги – 1.5 км³. Максимальное же снижение стока Волги за счет антропогенных факторов произошло в 1965 г. (более 25 км³/год в основном за счет аккумуляции воды в водохранилищах) и в 1985 г. (свыше 24 км³/год, главным образом в результате водозабора на различные нужды).

На Волге сезонные изменения стока наиболее ярко проявляются зимой и весной во время половодья. Причем расчеты показывают, что антропогенные и климатические факторы действуют в одном направлении, снижая сток половодья в ос-

новном за счет его регулирования. В зимний период климатические факторы приводят к малоаметному увеличению стока при очень существенном антропогенном увеличении, что обусловлено главным образом требованиями гидроэнергетики (рис. 4). В снижении стока половодья доля антропо-

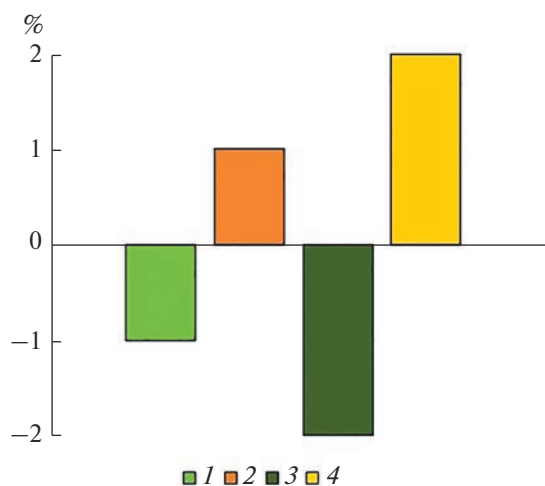


Рис. 3. Современное изменение годового стока Волги под влиянием косвенных воздействий на водозабор, %. 1 – неорошаемое земледелие, 2 – орошительная мелиорация, 3 – лесное хозяйство, 4 – урбанизация.

Составлено по: (Коронкевич и др., 2022).

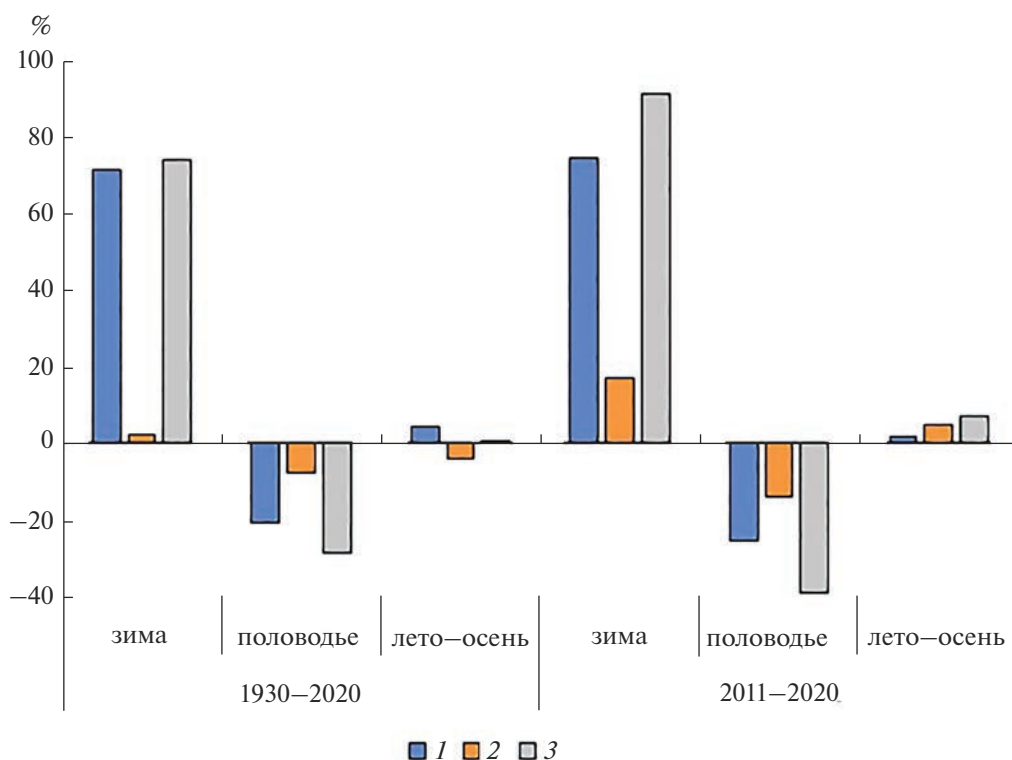


Рис. 4. Вклад антропогенных (1) и климатических (2) факторов в общие сезонные (3) изменения стока Волги у Волгограда.

погенных факторов составляет более 70% в 1930–2020 и свыше 60% в 2011–2020 гг.

Не потеряли актуальности и результаты исследования режима стока после зарегулирования, выполненного А.Е. Асариным (1987), согласно которым фактическое сезонное распределение стока несколько отличается от проектного и очень существенно от естественного, особенно зимой и весной в маловодные годы (рис. 5). Так, зарегулированный зимний сток выше естественного в это время более чем в 3 раза. В половодье же он снижается в маловодные годы более чем в 1.7 раза.

Из всех видов антропогенных воздействий влияние водохранилищ — одно из наиболее ощутимых как в годовом аспекте, так и особенно в сезонном. О плюсах (в основном для энергетики и водного транспорта) и минусах (в основном затопление ценных сельскохозяйственных угодий, уменьшение стока, ущерб для рыбного хозяйства) антропогенного изменения стока известно в целом довольно хорошо. Ряд исследователей считает, что водохранилища способствуют загрязнению воды. Негативные последствия создания водохранилищ вызвали даже предложения о спуске части из них, в первую очередь Рыбинского. Вместе с тем К.К. Эдельштейн (1998) считает, что не будь водохранилищ, в которых поступающие за-

грязнения многократно разбавляются волжской водой и частично нейтрализуются, Волга превратилась бы в “сточную канаву” из-за поступления в нее огромного количества загрязняющих веществ.

А.Б. Авакян (1991) показал, что спуск водохранилищ привел бы к огромному ущербу для хозяйства страны при неясных положительных аспектах. В числе возможных ущербов — изъятие из Единой энергетической системы 11.4 млн кВт установленной мощности ГЭС и около 40 млрд кВт ч ежегодной выработки, причем в значительной мере наиболее ценной пиковой электроэнергии; нарушение грузооборота Единой глубоководной системы европейской части страны; необходимость полного переустройства водоснабжения многих городов и сельских населенных пунктов, а также всей инфраструктуры отдыха на воде; резкое увеличение угрозы затопления и подтопления территорий; повторное загрязнение волжских вод донными отложениями; невозможность вовлечения в сельскохозяйственный оборот освобожденных от воды земель, многие из которых занесены илом и песком с большим содержанием загрязняющих ингредиентов, без огромных затрат на рекультивацию.

Тем не менее понятно, что существующее антропогенное воздействие на сток, режим Волги и

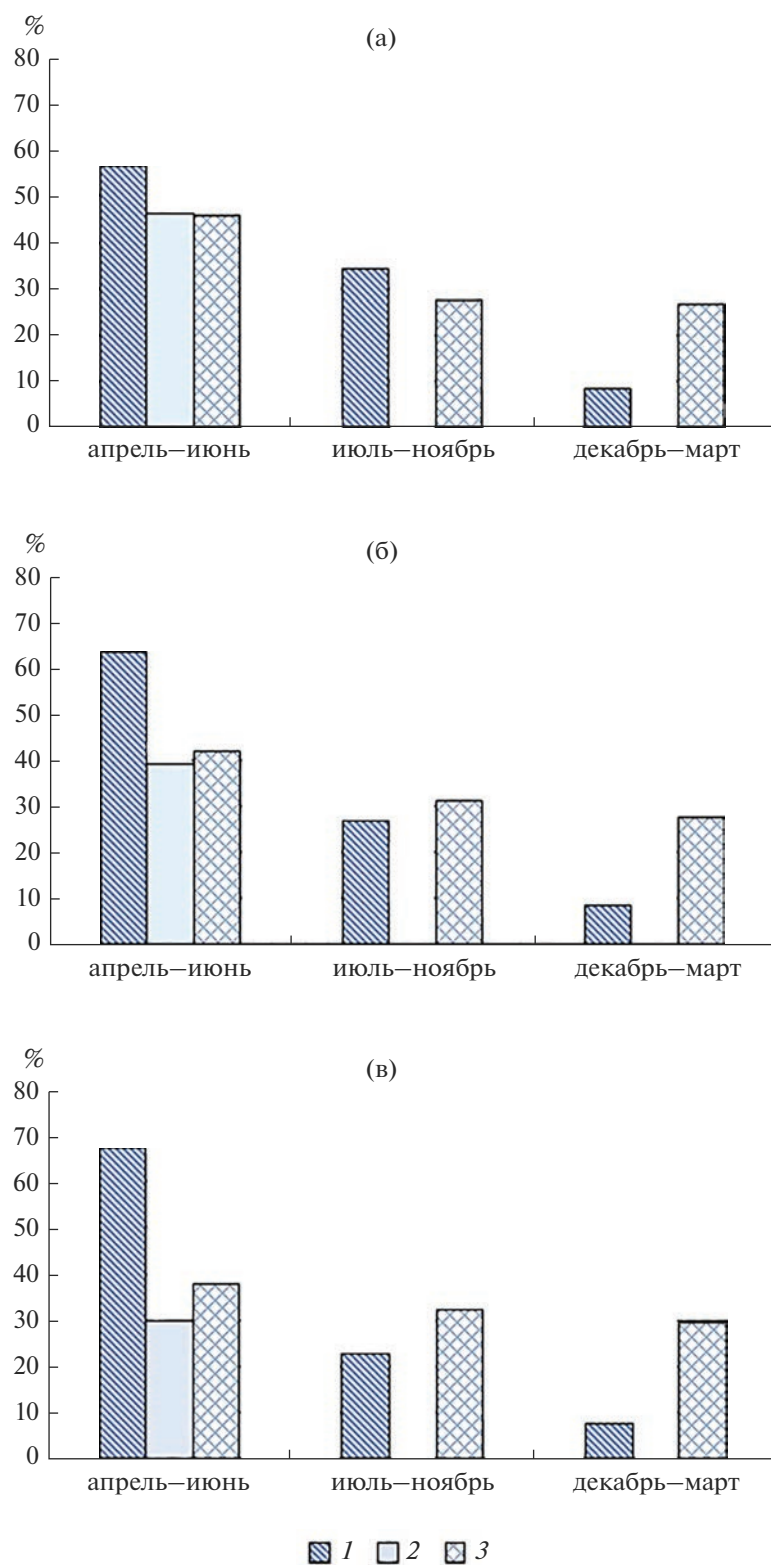


Рис. 5. Перераспределение водохранилищами стока Волги по сезонам в годы разной водности, %. (а) — многоводные годы, (б) — средние по водности и (в) — маловодные годы. 1 — естественное распределение, 2 — проектное распределение, 3 — фактическое распределение.
Составлено по: (Асарин, 1987).

связанное с ними качество вод вследствие влияния водохранилищ и водозабора нуждается в существенных коррективах. В первую очередь необходимо устранить потери воды в водном хозяйстве. Так, согласно (Водные ..., 2007–2019), ежегодные потери волжской воды при транспортировке к месту использования превышают 1 км^3 . Велики потери воды и при использовании на различные хозяйственные нужды. Устранение этих потерь может существенно повлиять и на соотношение антропогенных и климатических факторов в изменении стока Волги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение антропогенно измененного стока Волги у Волгограда за периоды 1930–2020 и 2011–2020 гг. с условно-естественным стоком этой реки за 1879–1929 гг. показало, что он в результате влияния антропогенных (водохранилища и водопотребление) и климатических факторов снизился в среднем за год соответственно на 28 км^3 (10.4%) и 25 км^3 (9.3%). Без учета других факторов, влияющих на уровень Каспийского моря, это способствовало ежегодному снижению уровня Каспия в среднем на 6–9 см.

Два независимых варианта расчета дали близкие значения соотношения вклада антропогенных и климатических факторов в общее уменьшение стока Волги: 40 и 60% по одному варианту расчета и около 47 и несколько более 53% – по другому за 1930–2020 гг. За 2011–2020 гг. различия более существенны. Их в значительной мере можно объяснить изменением состояния водосборов, которое не учитывается в водохозяйственной статистике. Вместе с тем различные виды хозяйственной деятельности на водосборах практически взаимокompенсируются во влиянии на сток в последние годы.

Сезонные изменения на Волге наиболее остро проявляются зимой и весной в период половодья, особенно в маловодные годы. Зарегулированный зимний сток превышает условно-естественный в это время в маловодные годы в 3 с лишним раза. Весеннее же половодье снижается более чем в 1.7 раза. В снижении стока половодья доля антропогенных факторов составляет более 70% в 1930–2020 и свыше 60% в 2011–2020 гг.

Антропогенное воздействие на сток Волги нуждается в оптимизации, что может существенно повлиять на изменение стока Волги и соотношение в нем вклада антропогенных и климатических факторов. Так, меры по более экономному использованию водных ресурсов приводят к уменьшению безвозвратного расхода воды и тем самым к снижению антропогенного вклада в общее изменение стока, а также к возрастанию роли климатических факторов. Обратная ситуация

складывается при неэкономном использовании водных ресурсов. Вместе с тем научно не обоснованы имеющие место предложения по спуску волжских водохранилищ.

В числе перспективных задач по рассматриваемой тематике – определение соотношения климатических и антропогенных факторов в изменении стока других рек в бассейне Волги и особенно выявление генезиса климатических изменений – насколько они все же естественного или антропогенного происхождения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

FUNDING

The study was carried out within the framework of the state assignment of the IG RAS FMGE-2019-0007 (AAAA19-119021990093-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян А.Б. Народнохозяйственные и экологические последствия спуска водохранилищ // Гидротехн. стр-во. 1991. № 8. С. 1–8.
- 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.
- Асарин А.Е. Современный режим притока воды к дельте Волги и его возможные изменения // Водные ресурсы. 1987. № 3. С. 5–12.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
- Водные ресурсы и водное хозяйство России: Стат. сб. М.: НИИ-Природа, 2007–2019.
- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический ин-т, 2008. 600 с.
- Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79.
<https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-36-79>
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Кашуткина Е.А., Милукова И.П. О вкладе климатических и антропогенных факторов в изменения стока крупных рек Русской равнины и Сибири // ДАН. 2019. Т. 488. № 5. С. 539–544.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П., Кашуткина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах круп-

- нейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: МАКС Пресс, 2014. 214 с.
- Государственный доклад "О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году". М.: НИИ-Природа, 2019. 290 с.
- Зайцева И.С. Маловодные годы в бассейне Волги: природные и антропогенные факторы. М.: ИГ АН СССР, 1990. 184 с.
- Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 205 с.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Вода и человек. М.: Изд-во "Перо", 2022. 324 с.
- Лавров С.А., Калужный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42–60.
- Попова В.В., Бабина Е.Д., Георгиади А.Г. Климатические факторы изменчивости стока Волги во второй половине XX–начале XXI вв. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 63–72.
<https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>
- Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество: Ежегод. изд. Л., СПб.: 1982–2020.
- Шалабанов А.К., Роганов Д.А. Практикум по эконометрике с применением MS EXCEL. Линейные модели парной и множественной регрессии. Казань: Академия управления "ТИСБИ", 2008. 53 с.
- Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 304 с.
- Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

On the Ratio of Climatic and Anthropogenic Factors in the Change of the Volga River Runoff

N. I. Koronkevich¹*, A. G. Georgiadi¹, E. A. Barabanova¹, E. A. Kashutina¹, and I. P. Milyukova¹

¹*Institute of Geography, Russia Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: koronkevich@igras.ru

Two variants (methods) were used to calculate the contribution of anthropogenic and climatic factors to the change in the annual and seasonal runoff of the Volga River at Volgograd during periods of significant anthropogenic impact on waters (1930–2020 and 2011–2020) compared with the conditionally natural period of runoff formation (1879–1929). The first is based on comparing the anthropogenic change in runoff due to the influence of reservoirs and irretrievable water consumption with the total change in runoff for the comparison periods. In the second variant, the reconstructed conditionally natural runoff during periods of significant anthropogenic impact is compared with the total change in runoff, calculated by the relationship between the Volga River runoff and the runoff of rivers that are indicators of climatic conditions. It is assumed that climatic changes are mainly of natural origin. It is revealed that the influence of anthropogenic and climatic factors on the overall decrease in the annual runoff of the Volga River in comparison with the conditionally natural period is unidirectional and comparable. Both variants of the calculation give similar values for the ratio of anthropogenic and climatic factors in the total change in runoff in the 1930–2020 period. There are more significant differences in the calculations for the 2011–2020 period and in the assessment of seasonal changes, most noticeably manifested in the spring flood and in the winter. Anthropogenic and climatic factors act in the same direction, reducing the flow of the spring flood and increasing it in the winter, mainly due to anthropogenic factors. The existing differences in the ratio of factors can largely be explained by landscape transformations in the Volga River basin, including in river basins that are indicators of climatic conditions. The impact of such transformations on runoff is not taken into account in water management statistics, although in recent decades different types of economic activities in watersheds have largely offset each other in their impact on runoff. The share of anthropogenic factors in the Volga River runoff changes can vary widely depending on the type of water resources use which is not always rational.

Keywords: annual and seasonal changes in river runoff, anthropogenic and climatic factors, variants and calculation methods

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Assessment of the impact of climate change on the water regime and river flow of the Volga basin. *Voda: Khim. Ekol.*, 2013, no. 4, pp. 3–12. (In Russ.).
- Asarin A.E. The modern regime of water inflow to the Volga delta and its possible changes. *Vodnye Resursy*, 1987, no. 3, pp. 5–12. (In Russ.).
- Avakyan A.B. Economic and ecological consequences of the dams draining. *Gidrotekh. Stroitel.*, 1991, no. 8, pp. 1–8. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. Present-day variations of the minimum runoff of the Volga basin rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, pp. 187–194.
<https://doi.org/10.3103/S1068373914030078>

- Edel'shtein K.K. *Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya* [Reservoirs of Russia: Environmental Problems, Ways to Solve Them]. Moscow: GEOS Publ., 1998. 277 p.
- Gel'fan A.N., Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. The impact of climate change on the annual and maximum flow of rivers in Russia: assessment and forecast. *Fundam. Priklad. Klimatol.*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 36–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-1-36-79>.
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Contribution of Climatic and Anthropogenic Factors to Changes in the Flow of Large Rivers of the Russian Plain and Siberia. *Dokl. Earth Sci.*, 2019, vol. 488, pp. 1211–1216. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19100106>
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsenarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseinakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in the River Flow in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: MAKSPress Publ., 2014. 214 p.
- Koronkevich N.I. *Vodnyi balans Russkoi ravniny i ego antropogennye izmeneniya* [The Water Balance of the Russian Plain and its Anthropogenic Changes]. Moscow: Nauka Publ., 1990. 205 p.
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S. *Voda i chelovek* [Water and Man]. Moscow: Pero Publ., 2022. 324 p.
- Lavrov S.A., Kalyuzhnii I.L. Influence of climatic changes on the spring flood runoff and factors of its formation in the Volga basin. *Vodn. Khoz. Ross. Probl. Tekhnol. Upravl.*, 2016, no. 6, pp. 42–60. (In Russ.).
- O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu. Gosudarstvennyi doklad* [On the State and Use of Water Resources of the Russian Federation in 2018. Government Report]. Moscow: NIA-Priroda Publ., 2019. 290 p.
- Popova V.V., Babina E.D., Georgiadi A.G. Climatic factors of the Volga runoff variability in the second half of the 20th–early 21st centuries. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 4, pp. 63–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019463-72>
- Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispol'zovanie i kachestvo (Ezhegodnoe izdanie)* [Surface and Groundwater Resources, Their Use and Quality (Annual Edition)]. Leningrad; St. Petersburg, 1982–2020.
- Shalabanov A.K., Roganov D.A. *Praktikum po ekonometrike s primeneniem MS EXCEL. Lineinye modeli parnoi i mnozhestvennoi regressii* [Workshop on Econometrics Using MS EXCEL. Linear Models of Paired and Multiple Regression]. Kazan: Acad. Management “TISBI” Publ., 2008. 53 p.
- Shiklomanov I.A. *Antropogennye izmeneniya vodnosti rek* [Man's Influence on the Quantitative Characteristics of Rivers]. Leningrad: Hydrometeoizdat Publ., 1979. 304 p.
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: Gos. Gidrol. Inst. Publ., 2008. 600 p.
- Vodnye resursy i vodnoe khozyaistvo Rossii (Statisticheskii sbornik)* [Water Resources and Water Management of Russia (Statistical Handbook)]. Moscow: NIA-Priroda Publ., 2007–2019.
- Zaitseva I.S. *Malovodnye gody v basseine Volgi: prirodnye i antropogennye faktory* [Low-Water Years in the Volga Basin: Natural and Anthropogenic Factors]. Moscow: Inst. Geogr., Akad. Nauk SSSR Publ., 1990. 184 p.

УДК 556.55(470)

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ ВЕРХНЕВОЛЖСКОГО И КАМСКОГО КАСКАДОВ В НАЧАЛЕ XXI СТОЛЕТИЯ

© 2023 г. С. В. Ясинский^а, *, И. С. Соболев^б, Д. Н. Хохлов^б, М. А. Фасахов^с, А. А. Шайдулина^с

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

^бНижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

^сПермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

*e-mail: yasisergej@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.06.2023 г.

После доработки 03.07.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Гидроэнергетика — важный фактор экономического развития страны, особенно учитывая, что она обеспечивает пиковые нагрузки в электрической сети, чего не могут сделать тепловые и атомные электростанции. Вместе с тем создание ГЭС и связанных с ними водохранилищ приводит к целому ряду проблем. В основном экологических (затопление больших площадей, нередко занятых ценными сельскохозяйственными угодьями, ущерб рыбному стаду и др.). Поэтому важно знать, насколько эффективно работают гидроэлектростанции. Попытка решить такую задачу принята в данной статье на примере Верхневолжского и Камского каскадов водохранилищ. Представлены основные сведения о них — площади зеркала, полном и полезном объемах, средней проектной выработке электроэнергии. Оценен вклад рассмотренных каскадов в выработку электроэнергии всего Волжско-Камского каскада водохранилищ. Сформированы ряды данных о годовом притоке, сбросе воды через гидроузлы и выработке на них электроэнергии с 2002 по 2021 г., по ряду станций с 2004 по 2022 г. Показана связь площади водохранилищ с их объемом, а также выработки электроэнергии с водностью отдельных лет и периодов. Установлена связь притока воды в водохранилища с ее сбросом через турбины ГЭС. Особое внимание уделено Рыбинскому водохранилищу, осуществляющему многолетнее регулирование стока. Рассчитана выработка электроэнергии в многоводные, средние по водности и маловодные годы. Оценено отклонение фактической выработки электроэнергии от средней проектной, на основании чего сделан вывод об эффективности работы ГЭС. Определена вероятность выработки электроэнергии в зависимости от прогнозных значений речного стока.

Ключевые слова: водохранилище, ГЭС, выработка электроэнергии, эффективность функционирования, годы разной водности, Верхневолжский и Камский каскады

DOI: 10.31857/S2587556623060146, **EDN:** APSVIX

ВВЕДЕНИЕ

Естественный режим речного стока далеко не всегда удобен для решения водных и других проблем. Так, на территории Русской равнины большая часть стока приходится на сравнительно кратковременный период весеннего половодья, тогда как основные потребности в воде имеют место в другие сезоны года. Нередки и маловодные годы. Это в полной мере относится к Верхней Волге и Каме и в целом к волжскому бассейну. В связи с этим еще в начале XX столетия возникла идея масштабного гидротехнического регулирования речного стока и создания Волжско-Камского каскада водохранилищ, составными частями которого стали Верхневолжский и Камский

каскады, рассматриваемые в данной статье, хотя необходимо отметить, что малые водохранилища и пруды создавались в рассматриваемом регионе уже давно. Масштабное же регулирование стока началось в конце 1930-х годов с создания Ивановского, Рыбинского и Угличского гидроузлов. Если основной целью Ивановского водохранилища и выходящего из него канала им. Москвы было обеспечение водой Московской агломерации, то Рыбинского и Угличского, а затем и других водохранилищ — обеспечение работы созданных на них ГЭС и удовлетворение острой потребности в электроэнергии населения и хозяйства европейской части страны, тем более пиковой, которую не могут обеспечить тепловые и атомные

станции. Конечно, попутно решались и проблемы удовлетворения потребностей в воде и других отраслей хозяйства.

Наряду с очевидными достоинствами создания водохранилищ имеется и целый ряд негативных последствий, среди которых затопление и подтопление сельскохозяйственных угодий, а нередко и застроенных территорий, население которых приходилось переселять, нарушение условий обитания водной и наземной фауны и др. Нередко высказывается мнение, что в наше время Волжско-Камский каскад в существующем ныне виде вряд ли был бы построен, а ряд уже созданных водохранилищ, особенно Рыбинское, приведшее к затоплению больших территорий, следовало бы полностью или частично спустить. Убедительный ответ на эти высказывания дал известный исследователь водохранилищ А.Б. Авакян (1991), который, не отрицая ряда негативных последствий их создания, показал, что, раз уж водохранилища Волжско-Камского каскада существуют, необходимо думать о совершенствовании их работы, а не об их спуске из-за чрезвычайно негативных последствий этого спуска как для сложившегося хозяйства в бассейне Волги, так и для экологических условий.

Не останавливаясь на всех последствиях создания водохранилищ, которых очень много, как положительных, так и отрицательных, основное внимание в данной статье уделим энергетическим аспектам.

Как известно, водохранилища осуществляют в основном сезонное, реже многолетнее регулирование стока, обычно имеет место и суточное регулирование стока (дважды в день меняется гидродинамический режим реки), что в значительной степени определяется спецификой работы ГЭС. В утренние и вечерние часы увеличивается расход воды через водоводы, а днем и ночью, в нерабочие часы и в праздники — сокращается практически до нуля (Эдельштейн, 1998). Очевидно, что ГЭС Волжско-Камского каскада играют очень важную роль в энергетическом балансе Европейской территории страны. Однако возможности дальнейшего увеличения выработки гидроэлектроэнергии здесь практически исчерпаны. Некоторым резервом этого увеличения, по мнению В.М. Евстигнеева (2008), могло бы стать наращивание установленной мощности на действующей Чебоксарской ГЭС (с 1.37 до 1.96 млн кВт) и возрождение малой энергетики. Увеличение выработки на Чебоксарской ГЭС связано с решением проблемы поднятия нормального подпорного уровня (НПУ) с современной отметки 63 м БС до

запланированной в первоначальном проекте отметки в 68 м. Дискуссии об этой проблеме длятся уже около 30 лет и связаны они с тем, что повышение уровня воды этого водохранилища при отметке 68 м БС приведет к затоплению больших по площади прибрежных территорий, в том числе и подтоплению крупных городов, таких как Нижний Новгород, а также возникновению ряда других экологических проблем (Захаров, Алексеев, 2012; Орехов, Краснов, 2013). Дискуссии по данной проблеме все еще продолжаются. Создание системы защитных сооружений может способствовать решению проблемы потопления территории, а подъем уровня воды на 5 м позволит кроме увеличения установленной мощности этой ГЭС в значительной степени решить транспортную проблему на участке от плотины Горьковской ГЭС до Нижнего Новгорода. Но все аспекты этой проблемы нужно оценивать с научной точки зрения и прогнозировать последствия их решения. Пока же будем ориентироваться на отметку НПУ 63 м.

Во многом аналогичная ситуация и с другим возможным источником увеличения выработки электроэнергии на каскаде — повышением проектного уровня НПУ Нижнекамского водохранилища, построенного в 1979 г., до 68 м БСВ (в настоящее время 63 м).

Что касается малой гидроэнергетики, то ее достоинства и преимущества в экономическом развитии России хорошо показаны в монографии Л.К. Малик (2005), в которой рассмотрены перспективные створы для создания 50 малых ГЭС. В настоящее время в рамках развития малой гидроэнергетики в стране на р. Кубани уже создан каскад Красногорских малых ГЭС (Мирзоев, Слива, 2019). Определенные возможности повышения выработки электроэнергии заложены в оптимизации использования водных ресурсов самих водохранилищ Волжско-Камского каскада (Левит-Гуревич, 2012). В этой связи основной целью данной работы является оценка энергетической эффективности функционирования Верхневолжского и Камского каскадов водохранилищ в годовом разрезе. Особенности выработки электроэнергии на ГЭС по отдельным сезонам и времени суток заслуживают особого внимания, что выходит за рамки данной статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно водохозяйственному районированию России, на ее территории образован 21 бассейновый округ. Рассматриваемые каскады водо-

Таблица 1. Основные параметры и проектные значения выработки электроэнергии на ГЭС Верхневолжских и Камских водохранилищ при нормальном подпорном уровне

Водохранилище	Параметры при нормальном подпорном уровне			Средняя проектная выработка электроэнергии, млн кВт ч
	площадь зеркала, км ²	полный объем, км ³	полезный объем, км ³	
Водохранилища Верхней Волги				
Иваньковское	316	1.12	0.89	119
Угличское	249	1.25	0.81	240
Рыбинское	4550	25.40	16.70	900
Горьковское	1591	8.82	2.78	1500
Чебоксарское	1080	5.10	—	2100
Всего	7786	41.69	21.18	4859
Водохранилища на Каме				
Камское	1915	12.2	9.8	2020
Воткинское	1120	9.4	4.45	2630
Нижнекамское	1370	4.2	0.77	1800
Всего	4405	25.8	15.02	6450
Суммарно по двум каскадам	12191	67.49	36.20	11309

Источник. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. <http://gis.vodinfo.ru> (дата обращения 10.03.2023); (Водохранилища ..., 2008; Эдельштейн, 1998).

хранилищ входят в Верхневолжский и Камский бассейновые округа¹.

В качестве критерия эффективности функционирования рассматриваемых каскадов водохранилищ использованы оценки отклонения фактической выработки электроэнергии на соответствующих ГЭС от средней проектной. Основные сведения о водохранилищах и ГЭС по-

черпнуты из (Водохранилища ..., 2008; Информационная ...²; Правила ..., 2014, 2016).

Попутно анализу подверглись такие факторы выработки гидроэнергии на рассматриваемых ГЭС, как приток воды в водохранилища и сброс ее из них. Проанализированы как отдельные годы, группы лет различной водности, так и рассматриваемые периоды в целом.

¹ Водный кодекс РФ, Федеральный закон № 74 от 03.06.2006, с изменениями на 28.04.2023.

² Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 10.03.2023).



Рис. 1. Площадь зеркала и полный объем (при нормальном подпорном уровне) водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов.

Для анализа функционирования рассматриваемых каскадов водохранилищ на рр. Волге и Каме сформированы ряды данных о годовых притоке, сбросе воды через гидроузлы и выработке на них электроэнергии с 2002 по 2021 г., по ряду станций с 2004 по 2022 г. (Информационная ...²; Научно-прикладной ..., 2017, 2021). К сожалению, не для всех водохранилищ удалось получить необходимую полную информацию за все эти годы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Общая площадь зеркала рассматриваемых водохранилищ превышает 12 тыс. км² (табл. 1), из которых примерно 60% площади зеркала, полного и полезного объемов и немногим более 40% проектной выработки электроэнергии приходится на Верхневолжский каскад водохранилищ. Самым крупным по площади, полному и полезному объемам является Рыбинское, которое в отличие от остальных осуществляет многолетнее регулирование стока. Однако по проектной выработке электроэнергии Рыбинская ГЭС занимает довольно скромное место в каскаде. Режим работы остальных водохранилищ – в основном сезонное и суточное регулирование стока. По размерам проектной выработки электроэнергии выделяется Воткинская ГЭС. В итоге оба каскада должны

вырабатывать примерно 30% общей выработки Волжско-Камского каскада.

Анализ соотношения площади зеркала водохранилищ и их объемов показывает, что в целом, чем больше площадь зеркала, тем больше полный объем (рис. 1). Гораздо менее выражена связь площади зеркала с размером полезного объема. Не наблюдается прямой зависимости проектной выработки электроэнергии от объема водохранилищ (рис. 2). При значительных объемах воды в Горьковском, Камском и особенно Рыбинском водохранилищах их планируемая выработка электроэнергии даже ниже, чем в меньших по объему воды Чебоксарском, Нижнекамском и, особенно, Воткинском водохранилищах.

Очевидно, что выработка электроэнергии во многом зависит от величины стока, что хорошо видно на примере Рыбинской и Воткинской ГЭС (рис. 3). Очень важно, что сток за рассматриваемый период был выше средних многолетних значений, хотя отдельные годы отличались пониженными значениями (рис. 4). Определенное влияние на выработку электроэнергии оказывает соотношение притока к водохранилищам и сброса воды. Для большинства лет и водохранилищ это соотношение несколько больше единицы из-за того, что часть поступающей воды расходуется

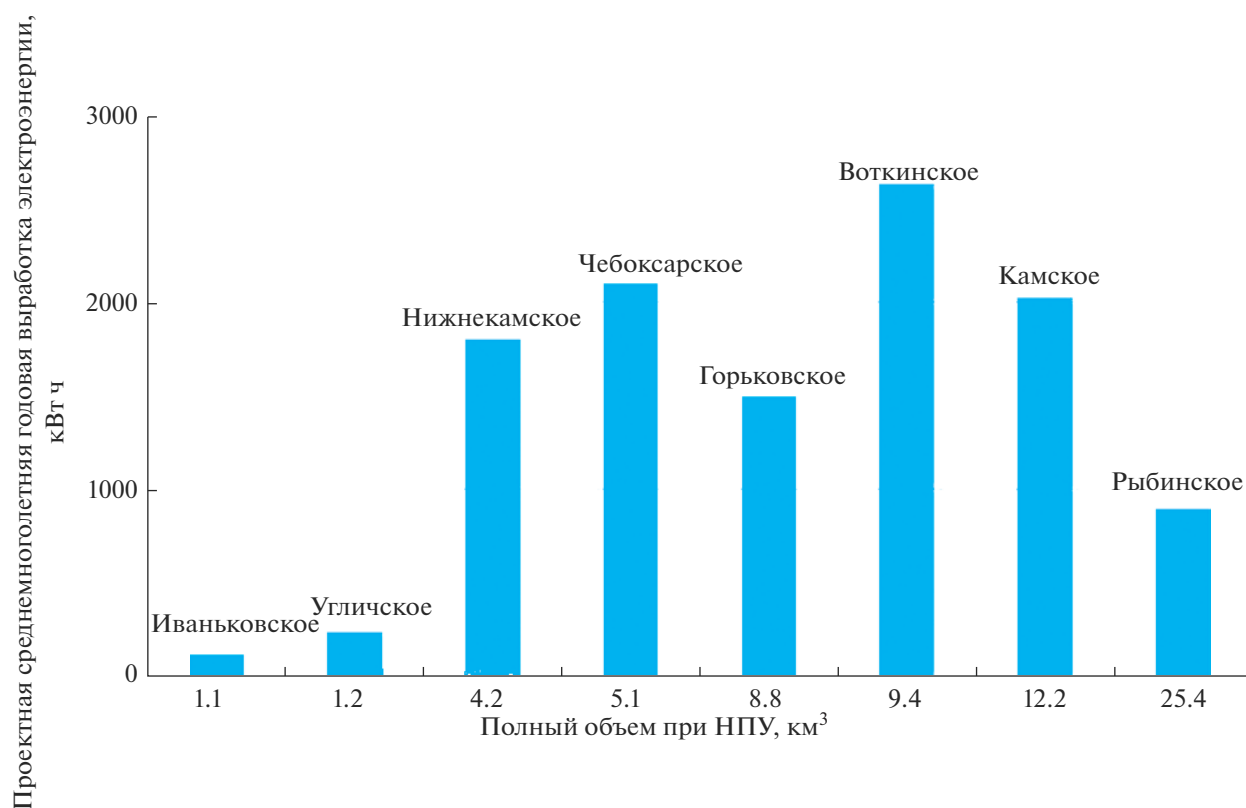


Рис. 2. Проектная среднегодовая выработка электроэнергии и полный объем (при нормальном подпорном уровне) водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов.

на испарение с акватории, на нужды различных потребителей. Но в ряде случаев наблюдается обратная картина, например, в случае необходимости холостых сбросов при наступлении чрезвычайных ситуаций. Это наиболее характерно для водохранилищ многолетнего регулирования стока, каким является Рыбинское водохранилище (табл. 2). Указанное соотношение во многом зависит от положения стока конкретного года в гидрологическом ряду и запросов со стороны водопотребителей и водопользователей районов, расположенных ниже по течению.

Возвращаясь к теме влияния величины стока на выработку электроэнергии, отметим, что повышенный сток за рассматриваемый период во многом определил и повышенную в целом выработку электроэнергии за этот период, особенно в многоводные годы. Наиболее достоверную оценку такого влияния водности на выработку электроэнергии можно получить по данным нескольких лет, объединенных в группы различной водности. Это сделано в табл. 3. В многоводные годы фактическая выработка электроэнергии на всех

ГЭС превышает запланированную в проекте. Причем наибольшее отклонение на Верхневолжском каскаде отмечается на Рыбинской ГЭС (больше чем на 50%), на Камском — на Воткинской ГЭС (почти на 22%); наименьшее — на ГЭС Угличского и Нижнекамского водохранилищ. В средние по водности годы фактическая выработка электроэнергии наиболее близка к проектной, с наибольшим превышением на ГЭС Рыбинского водохранилища. Также наиболее существенно отклонение от проектных значений в средние по водности годы на Угличской и Воткинской ГЭС. В маловодные годы происходит недовыработка электроэнергии на 10–15% на обоих каскадах.

Обобщенное представление о вероятности выработки определенного количества электроэнергии в зависимости от сброса воды через турбины ГЭС дают рис. 5 и 6. Данные графики могут быть использованы в прогнозах выработки электроэнергии на рассматриваемых ГЭС с учетом рассчитанного или прогнозного значения сброса воды через них.

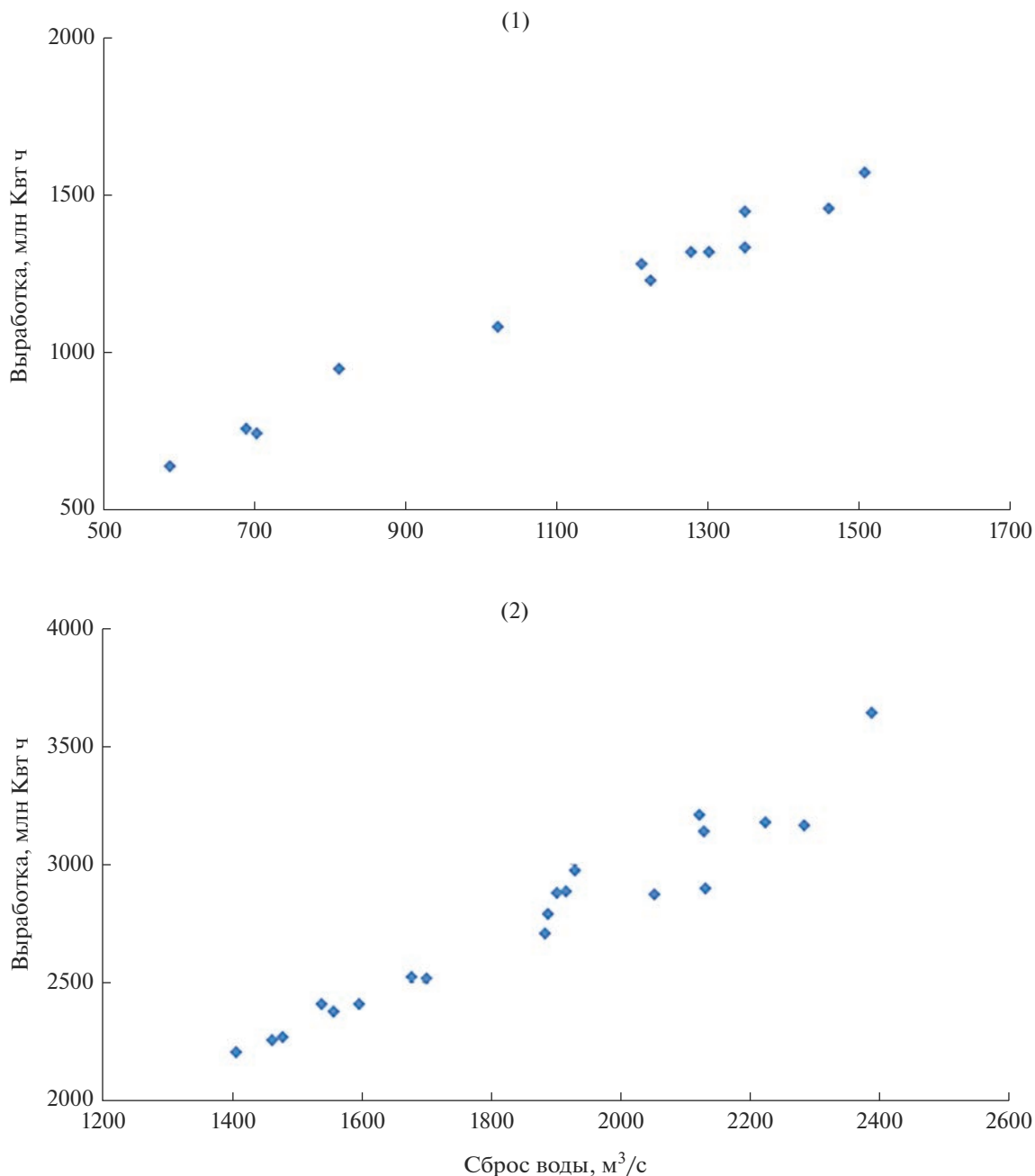


Рис. 3. Зависимость выработки электроэнергии от сброса воды на Рыбинской (1) и Воткинской (2) ГЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты показали, что на долю Верхневолжского и Камского каскадов водохранилищ приходится около 30% выработки электроэнергии на всем Волжско-Камском каскаде. Для большинства водохранилищ этих каскадов прослеживается связь между их полным объемом и площадью акватории. Однако не выявлено за-

висимости между объемами воды в водохранилищах и величиной выработанной электроэнергии. На Верхней Волге и Каме в начале XXI в. выявлена в целом повышенная величина стока по сравнению с его нормой, что способствовало повышению выработки электроэнергии на ГЭС обоих рассматриваемых каскадов, хотя был и целый ряд маловодных лет. Как правило, на большинстве

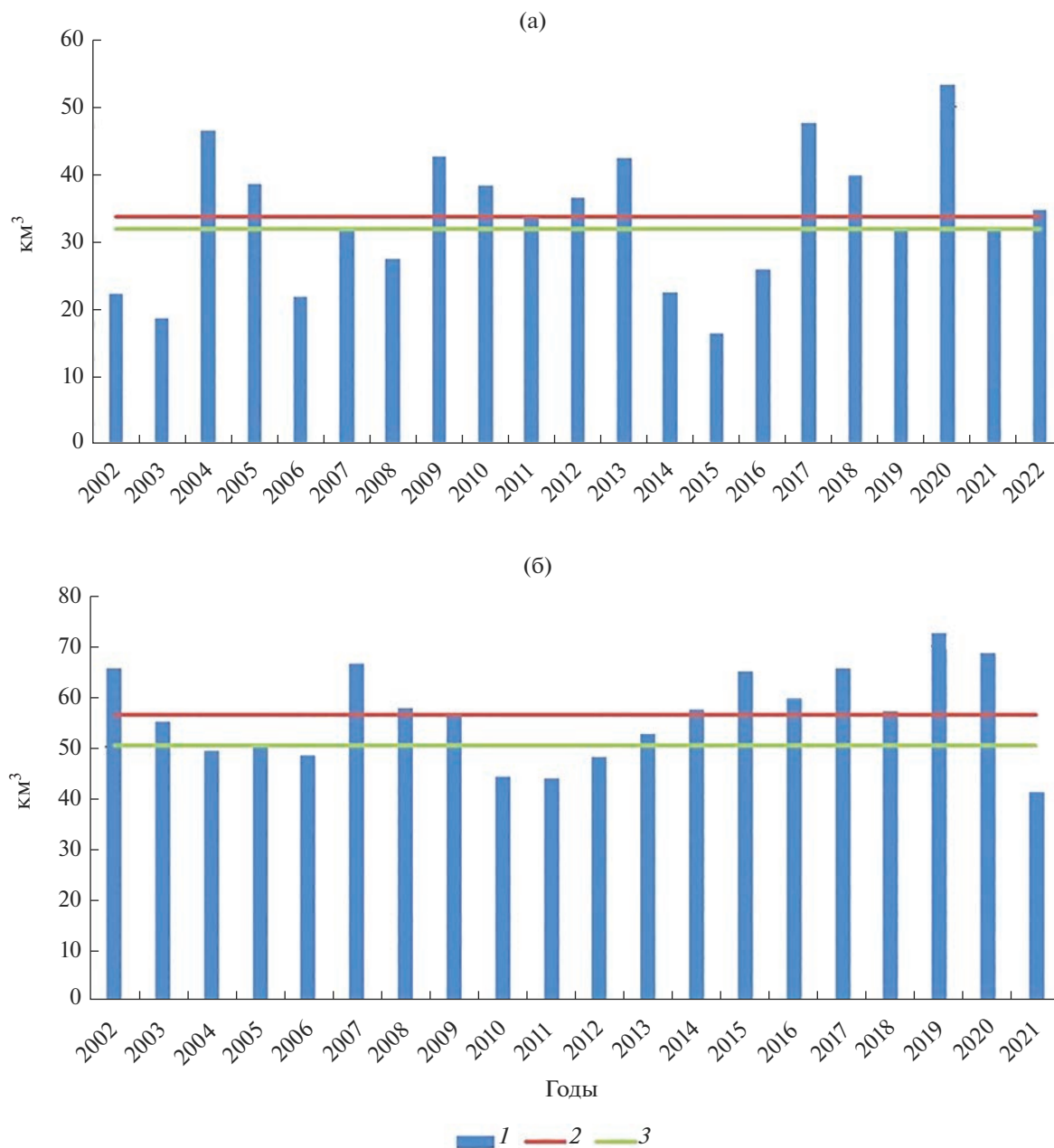


Рис. 4. Динамика сброса воды через агрегаты Рыбинской (а) и Камской (б) ГЭС. 1 – годовой сброс; 2 – средний сброс за период; 3 – норма стока в створах ГЭС.
Составлено по: (Ресурсы ..., 2021).

водохранилищ и в большинстве лет приток воды несколько превышает сброс воды. Обратная ситуация чаще всего складывается на Рыбинском водохранилище, осуществляющем многолетнее регулирование стока. В многоводные годы фактическая выработка электроэнергии на всех ГЭС превышает среднюю запланированную в их проектах, причем на ГЭС Рыбинского водохранилища – более чем на 50%. В маловодные годы выработка электроэнергии в целом не достигает сред-

ней проектной на 10–15%. В средние по водности периоды фактическая выработка электроэнергии близка к проектной, с наибольшим превышением на ГЭС Рыбинского водохранилища. В будущем полученные показатели эффективности работы рассмотренных ГЭС могут быть скорректированы в зависимости от возможных гидроклиматических изменений и изменений экономической ситуации в регионе.

Таблица 2. Соотношение притока и сброса воды в Рыбинском водохранилище, км³

Год	Суммарный приток	Суммарный сброс	Водохозяйственный баланс
2004	46.04	46.4	−0.36
2005	33.55	38.57	−5.02
2006	29.61	21.8	7.81
2007	24.98	31.85	−6.87
2008	33.92	27.53	6.39
2009	41.51	42.66	−1.15
2010	34.69	38.33	−3.64
2011	33.43	33.63	−0.2
2012	43.577	36.481	7.096
2013	37.201	42.412	−5.2
2014	17.258	22.458	−5.2
2015	21.766	16.412	5.354
2016	29.922	25.828	4.094
2017	51.075	47.555	3.52
2018	32.973	40.155	−7.182
2019	38.158	32.299	5.859
2020	49.488	53.346	−3.858
2021	32.506	31.515	0.991
2022	32.956	34.711	−1.755
Среднее за период	34.98	34.94	0.04

Источник: (Научно-прикладной ..., 2017; Ресурсы ..., 2021).

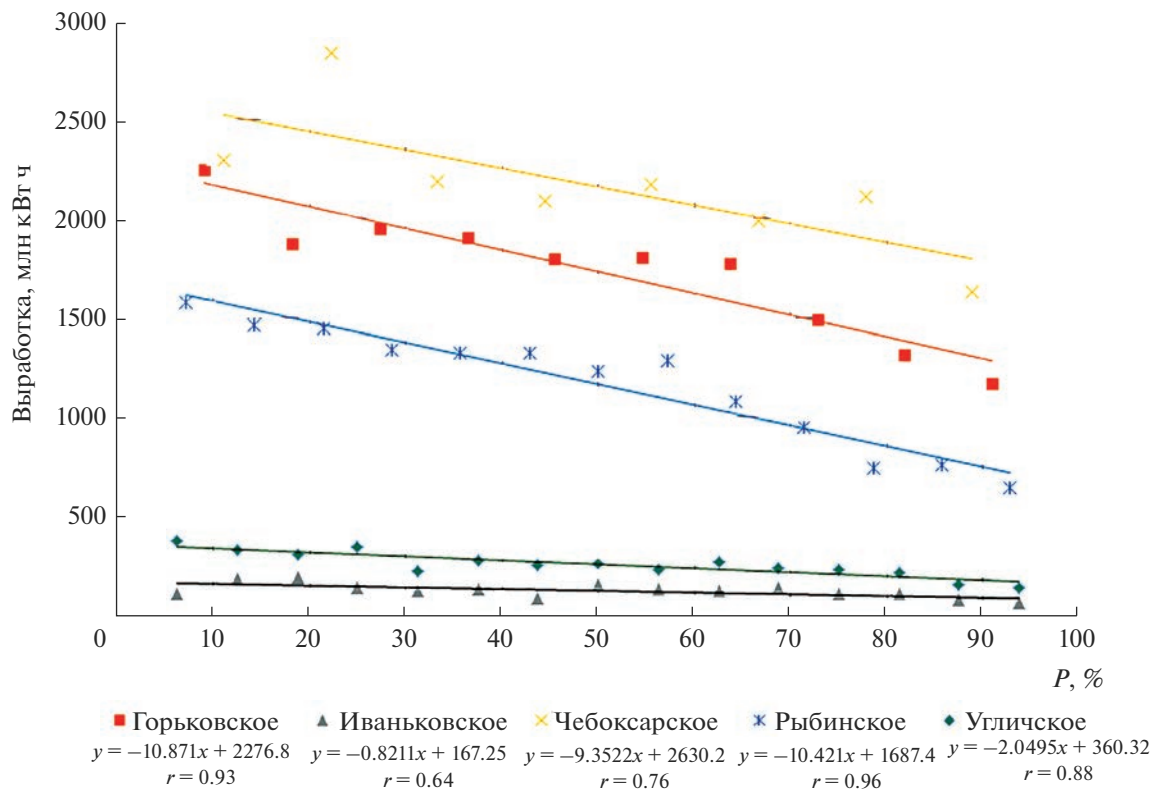


Рис. 5. Вероятность выработки электроэнергии на ГЭС водохранилищ Верхней Волги в зависимости от сброса воды в годы разной обеспеченности его превышения в гидрологическом ряду.

Таблица 3. Выработка электроэнергии и сброс воды в нижний бьеф водохранилищ Верхней Волги и Камы в различные по водности годы

Показатель	Водохранилища ГЭС Верхней Волги					Водохранилища ГЭС Камы		
	Иваньковское	Угличское	Рыбинское	Горьковское	Чебоксарское	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Проектная выработка электроэнергии, млн кВт ч	119	240	900	1500	2100	2020	2630	1800
Многоводные годы								
Фактическая выработка электроэнергии, млн кВт ч	151.1	316.1	1427.9	1995.1	2437.0	2313.2	3205.5	2037.7
Среднегодовой сброс воды, м ³ /с	374.3	518.0	1395.4	1965.8	4065.7	2134.6	2216.3	3514.4
% от проектной выработки	127.0	131.7	158.7	133.0	116.0	114.5	121.9	113.2
Средние по водности годы								
Фактическая выработка электроэнергии, млн кВт ч	127.0	260.3	1229.9	1791.9	2082.7	2047.4	2806.0	1879.1
Среднегодовой сброс воды, м ³ /с	261.0	368.0	1185.8	1696.0	3232.0	1797.4	1899.6	2832.8
% от проектной выработки	106.7	108.5	136.7	119.0	99.2	101.4	106.7	104.4
Маловодные годы								
Фактическая выработка электроэнергии, млн кВт ч	100.5	197.1	775.9	1325.5	1871.0	1778.1	2354.1	1638.1
Среднегодовой сброс воды, м ³ /с	168.0	258.0	698.9	1167.8	2501.7	1474.1	1534.5	2260.7
% от проектной выработки	84.5	82.1	86.2	88.4	89.1	88.0	89.5	91.0

Источник: (Научно-прикладной ..., 2021; Правила ..., 2016, 2014).

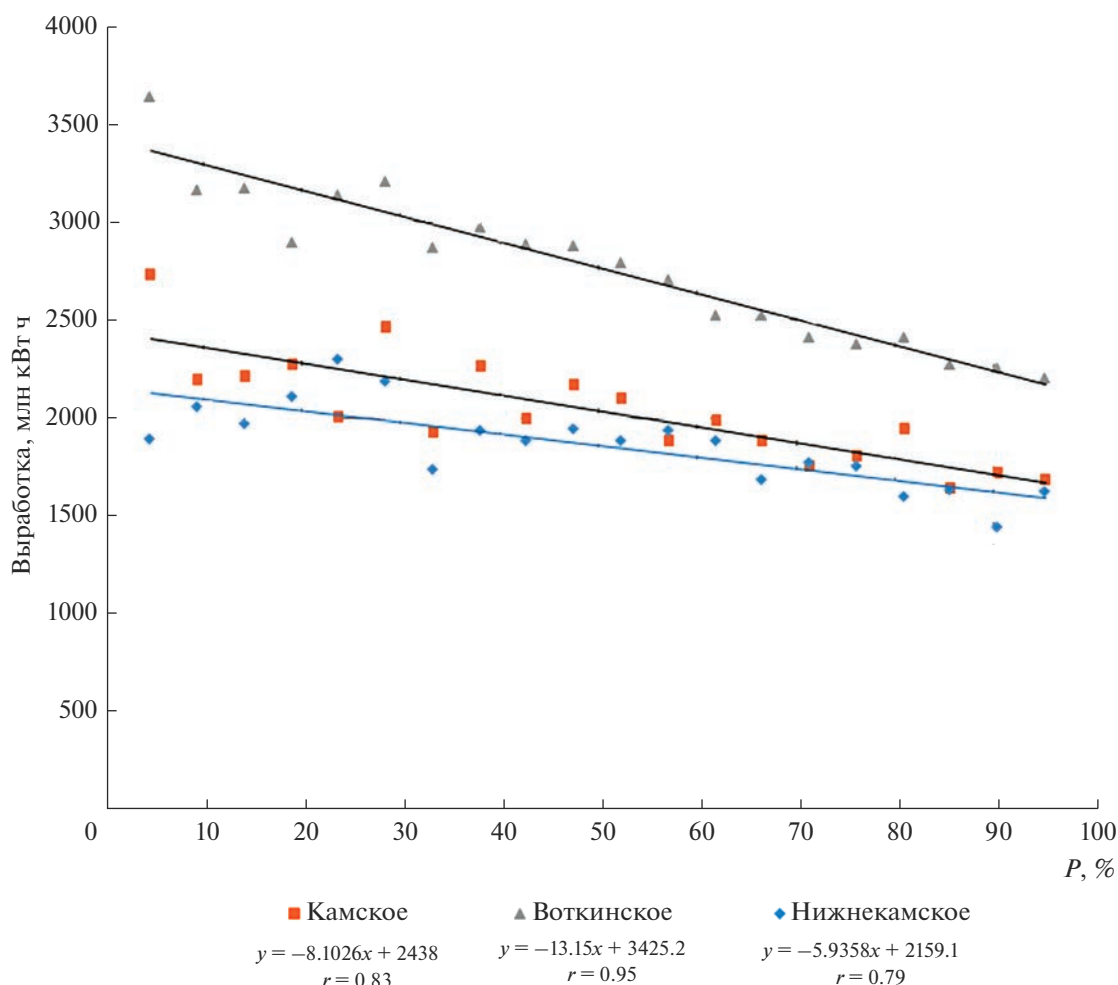


Рис. 6. Вероятность выработки электроэнергии на ГЭС водохранилищ Камы в зависимости от сброса воды в годы раз-ной обеспеченности его превышения в гидрологическом ряду.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-17-00224 “Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях”.

FINANCING

The work was carried out with financial support of the Russian Science Foundation grant 22-17-00224 “Formation of hydrological and geochemical processes in the catchment areas of the cascades of the Upper Volga and Kama reservoirs under various land use scenarios and climate changes in their territories.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авакян А.Б. Народнохозяйственные и экологические последствия спуска водохранилищ // Гидротехн. стр-во. 1991. № 8. С. 1–8.

Водоохранилища Верхней Волги / рук. В.С. Дементьев. Нижний Новгород: Верхне-Волжское БВУ, 2008. 156 с.

Евстигнеев В.М. Современный гидроэнергетический потенциал и тенденции его использования // Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс-Пресс, 2008. С. 175–183.

Захаров А.В., Алексеев И.А. Социально-экологические проблемы Чебоксарского водохранилища // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 5. С. 90–101.

Левит-Гуревич Л.К. Рациональное управление водными ресурсами водохранилищ на примере Волжско-Камского каскада // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. № 1 (9). С. 2343–2354.

Малик Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М.: Наука, 2005. 354 с.

Мирзоев М.И., Слива И.В. Проект строительства Краснотуркменских малых ГЭС на р. Кубань // Гидротехника. 2019. № 3 (56). С. 8–11.

Научно-прикладной справочник Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.

Научно-прикладной справочник: Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: "ООО РПЦ Офорт", 2017. 132 с.

Орехов В.Ф., Краснов А.Н. Проблемы Чебоксарского водохранилища // Астраханской вестн. экологического образования. 2013. № 3 (25). С. 170–184.

Правила использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Каме. М.: Федеральное агентство водных ресурсов, 2016. 202 с.

Правила использования водных ресурсов Нижнекамского водохранилища на р. Каме. М.: Федеральное агентство водных ресурсов, 2014. 132 с.

Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество (Справочное издание). СПб., 2021. 153 с.

Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

Energy Efficiency Assessment of the Upper Volga and Kama Cascades of Reservoirs at the Beginning of the 21st Century

S. V. Yasinsky^{1, *}, I. S. Sobol², D. N. Khokhlov², M. A. Fasakhov³, and A. A. Shaydulina³

¹*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

²*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia*

³*Perm State University, Perm, Russia*

*e-mail: yasisergej@yandex.ru

Basic information about the Upper Volga and Kama cascades of reservoirs is presented: water surface area, full and useful volume capacity, and average project power generation. The contribution of the considered cascades to the power generation of the entire Volga–Kama cascade of reservoirs is estimated. Data series have been generated on the annual inflow, discharge of water through hydroelectric facilities, and generation of electricity from 2002 to 2021, for several stations from 2004 to 2022. The relationship between the area of reservoirs and their capacity is shown, as well as the generation of electricity with the water content of individual years and periods. A relationship has been established between the inflow of water into the reservoirs and its discharge through the turbines of the hydroelectric power plants. Particular attention is paid to the Rybinsk reservoir, which performs over-year water storage. The generation of electricity in high-water, medium-water, and low-water years is calculated. The deviation of the actual electricity generation from the average design was estimated, based on which a conclusion was made about the efficiency of the hydroelectric power plants. The probability of electricity generation is determined depending on the predicted values of the river runoff.

Keywords: reservoir, hydroelectric power station, power generation, efficiency, years of different water content, Upper Volga and Kama cascades

REFERENCES

Avakyan A.B. National economic and environmental consequences of the descent of reservoirs. *Gidrotekh. Stroitel.*, 1991, no. 8, pp. 1–8. (In Russ.).

Edelshtein K.K. *Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya* [Reservoirs of Russia: Environmental Problems, Ways to Solve Them]. Moscow: GEOS Publ., 1998. 277 p.

Evstigneev V.M. Modern hydropower potential and trends in its use. In *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh po-tepleniya XXI veka* [Forecast of Climatic Resource Availability of the East-European Plain in the Conditions of Warming of the 21st Century]. Moscow: Max-Press Publ., 2008, pp. 175–183. (In Russ.).

Levit-Gurevich L.K. Rational management of water resources of reservoirs on the example of the Volga–Kama cascade. *Izv. Samar. Nauch. Tsentra RAN*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 2343–2354. (In Russ.).

Malik L.K. *Fakty riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Problemy bezopasnosti* [Risk Factors for Damage to Hydraulic Structures. Security Issues]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 354 p.

Mirzoev M.I., Sliva I.V. The project for the construction of Krasnogorsk small hydroelectric power stations on the river. *Kuban. Hydrotech.*, 2019, vol. 56, no. 3, pp. 8–11. (In Russ.).

Nauchno-prikladnoi spravochnik Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii [Scientific and Applied Handbook Long-term Fluctuations and Variability of Water Resources and the Main Characteristics of the Flow of Rivers in the Russian Federation]. Georgievsky V.Yu., Ed. St. Petersburg: Rial Publ., 2021. 190 p.

Nauchno-prikladnoi spravochnik: Mnogoletnie kharakteristiki pritoka vody v krupneishie vodokhranilishcha [Scientific and Applied Handbook: Long-term Characteristics of Water Inflow into the Largest Reservoirs]. Geor-

- gievsky V.Yu., Ed. St. Petersburg: "ООО RPTS Ofort" Publ., 2017. 132 p.
- Orekhov V.F., Krasnov A.N. Problems of the Cheboksary reservoir. *Astrakh. Vestn. Ekol. Obraz.*, 2013, vol. 25, no. 3, pp. 170–184. (In Russ.).
- Pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov Kamskogo i Votkinskogo vodokhranilishch na r. Kame* [Rules for the Use of Water Resources of the Kama and Votkinsk Reservoirs on the Kama River]. Moscow: Fed. Ag. Vodn. Resur. Publ., 2016. 202 p.
- Pravila ispol'zovaniya vodnykh resursov Nizhnekamskogo vodokhranilishcha na r. Kame* [Rules for the Use of Water Resources of the Nizhnekamsk Reservoir on the Kama River]. Moscow: Fed. Ag. Vodn. Resur. Publ., 2014. 132 p.
- Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispol'zovaniye i kachestvo (Ezhegodnoe izdanie)* [Resources of Surface and Ground Waters, Their Use and Quality (Annual Edition)]. St. Petersburg, 2021. 153 p.
- Vodokhranilishcha Verkhnei Volgi* [Reservoirs of the Upper Volga]. Dementiev V.S., Ed. Nizhnii Novgorod: Verkhne-Volzhskoe BVU, 2008. 156 p.
- Zakharov A.V., Alekseev I.A. Socio-environmental problems of the Cheboksary reservoir. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2012, no. 5, pp. 90–101. (In Russ.).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 556.18.(282.247.41)

ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ И ВОДООТВЕДЕНИЕ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ВОЛГИ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ВОДЫ

© 2023 г. А. П. Демин*

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

**e-mail: deminar@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.05.2023 г.

После доработки 15.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Цель исследования — оценка изменения объемов водопотребления и водоотведения в бассейне р. Волги и ее основных притоков в 1990–2021 гг. в связи с изменяющимися условиями, а также их влияние на качество воды. Исходными материалами служили данные Федерального агентства водных ресурсов России (Росводресурсы) по разнообразным водохозяйственным показателям и данные автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов. Для оценки качества поверхностных вод привлекались материалы региональных природоохранных ведомств, материалы Роспотребнадзора. Использовались данные региональных ФГБУ по оценке состояния орошаемых сельскохозяйственных угодий. Выявлено, что с 1990 по 2021 г. забор пресной воды в бассейне р. Волги сократился в 2.3 раза. Коэффициент водооборота вырос с 79.5 до 86.7%. В последние годы начался рост площади орошаемых земель. Среднесуточное удельное водопотребление на 1 жителя снизилось во всех регионах в результате внедрения приборов учета воды и водосберегающей техники в жилищно-коммунальном хозяйстве. Выявлено, что доля загрязненных вод в общем объеме отводимых вод снизилась с 47.3% в 1990 до 43.4% в 2021 г., но в бассейнах некоторых притоков Волги она выросла. До нормативов сейчас очищается только каждый шестой кубометр загрязненной воды, подлежащей очистке. Установлено, что количество основных загрязняющих веществ, сброшенных со сточными водами, снизилось за 1990–2021 гг. в десятки раз. Хотя и произошел существенный прирост мощности очистных сооружений за годы действия Федерального проекта “Оздоровление Волги” (2019–2021 гг.), по 6 из 12 важнейших веществ за этот период отмечается рост загрязнений. Несмотря на снижение контролируемой массы поступающих загрязняющих веществ, улучшения качества поверхностных вод в целом не наблюдается, что говорит о росте загрязнений, поступающих от диффузных источников и, возможно, донных отложений.

Ключевые слова: речные бассейны, орошение земель, водопотребление, сточные воды, качество речных вод, сброс загрязняющих веществ, очистные сооружения

DOI: 10.31857/S2587556623060055, **EDN:** EGCKAJ

ВВЕДЕНИЕ

Волга — крупнейшая река Европы. Водосборная площадь ее бассейна составляет, по разным оценкам, от 1360 до 1431 тыс. км², что равняется почти трети европейской части нашей страны. Из-за выгодного экономико-географического положения, полноводности и большой протяженности Волга всегда была главной рекой России. В ее бассейн входят полностью или частично территории 38 субъектов Российской Федерации, в том числе 8 республик, 29 областей и Москва.

Хотя Волжский бассейн занимает только 8% территории РФ, это важнейший в экономическом отношении регион России. Расчеты, выполненные нами на основе обработки статистиче-

ских материалов Росстата¹, показывают, что здесь располагается 32% посевов сельскохозяйственных культур, 45% основных фондов, производится почти половина валового регионального продукта России, что определяет высокую степень антропогенной нагрузки (табл. 1). На начало 2023 г. на территории бассейна проживало 61.3 млн человек (41.8% населения страны), из них 49.5 млн — в городах. На долю Волги и ее притоков приходится более 70% грузооборота речного транспорта России. Водохранилища каскада обеспечивают с высокой степенью надежности водоснабжение городов и промышленных узлов, а также широко

¹ Сайт Федеральной службы государственной статистики. <http://www.gks.ru> (дата обращения 16.05.2023).

Таблица 1. Основные показатели социально-экономического развития субъектов РФ в бассейне р. Волги

Регион	Число субъектов РФ*	Площадь территории в пределах бассейна, тыс. км ²	Численность населения на 01.01.2023 г., тыс. чел.			Основные фонды отраслей экономики на конец 2021 г., млрд руб.	Валовой региональный продукт, 2020 г., млрд руб.	Площадь посевов сельскохозяйственных культур, 2021 г., тыс. га
			всего	городское	сельское			
Верхняя Волга	27/10	648.0	39033.0	32719.9	6313.1	133655.3	32632.5	10640.4
Кама	14/1	504.3	11519.2	8271.4	3247.8	24249.6	5721.0	6445.1
Нижняя Волга	9/2	278.3	10713.0	8511.7	2201.3	20857.7	5231.0	8468.8
Всего по бассейну Волги	38/17	1430.7	61265.2	49503.0	11762.2	178762.6	43584.5	25554.3
Бассейн Волги, % от РФ		8.4	41.8	45.1	32.0	44.7	46.5	31.8
Часть бассейна, % от всего бассейна								
Верхняя Волга		45.3	63.7	66.1	53.7	74.8	74.9	4.6
Кама		35.2	18.8	16.7	27.6	13.6	13.1	25.2
Нижняя Волга		19.5	17.5	17.2	18.7	11.7	12.0	33.2

Примечание. * Числитель — общее количество субъектов Федерации, знаменатель — количество субъектов, полностью входящих в бассейн Волги.

используются для массового отдыха, оздоровления и спорта.

Один из основных постулатов модели устойчивого развития — гармоничное сочетание социально-экономических и экологических приоритетов развития общества. Эффективной может быть признана экономика, обеспечивающая удовлетворение жизненных потребностей при одновременном уменьшении расходов сырья и энергии, сокращении отходов производства. Для экологической реабилитации волжского бассейна необходимо осуществление комплекса мер по охране и воспроизводству водных ресурсов на водосборных площадях, рационализация систем водопользования на основе осуществления политики водосбережения, сокращение объема забора свежей воды. Снижение водопотребления является необходимым условием сокращения объемов отводимых сточных вод и, следовательно, загрязняющих веществ (ЗВ), содержащихся в них. Очень важно также совершенствовать технологии очистки сточных вод, уменьшать диффузное поступление ЗВ.

Бассейн Волги имеет огромную протяженность, включает в себя несколько природно-климатических зон (от таежной до полупустынной) и много регионов, характеризующихся своей специализацией производства, исходя из общероссийского разделения труда и специфики использования водных ресурсов. В целях более детального анализа эффективности водопользования разделим его, как это принято, на три части — Верхнюю Волгу, Каму и Нижнюю Волгу.

Водохозяйственная система Верхней Волги обеспечивает водоснабжение населения и хозяйства 27 субъектов федерации, а также водный транспорт, орошаемое земледелие, рыбозапасовое хозяйство, гидроэнергетику и специальные экологические попуски. Площадь бассейна составляет 648 тыс. км², а численность населения превышает 39 млн человек. Этот регион характеризуется высокой концентрацией промышленного производства, торговли и отраслей, оказывающих нерыночные услуги. Здесь производится 75% валовой региональной продукции бассейна Волги. В пределах этой территории формируется более половины водных ресурсов всего бассейна и поэтому их состояние здесь, безусловно, отражается на состоянии водных ресурсов Нижней Волги и Северного Каспия.

Сток левого притока Волги — р. Камы — регулируется Камским, Воткинским и Нижнекамским водохранилищами. Водохозяйственная система Камы обеспечивает водоснабжение населения и хозяйства Пермского края, Кировской области, республик Удмуртии, Башкортостана, Чувашии, Татарстана, и частично Вологодской, Костромской, Нижегородской, Оренбургской, Свердловской, Челябинской областей, республик Марий Эл и Коми, а также водный транспорт, рыбозапасовое хозяйство, орошаемое земледелие, гидроэнергетику и специальные экологические попуски. Площадь бассейна составляет 504 тыс. км², а численность населения 11.5 млн человек. Этот регион наряду с высокой концентрацией промышленности (прежде всего топливной, машиностроения, химической и нефтехимиче-

ской) характеризуется развитым сельским хозяйством.

Бассейн Нижней Волги охватывает территорию девяти субъектов РФ (республик Калмыкии и Татарстана, Астраханской, Волгоградской, Оренбургской, Самарской, Саратовской, Ульяновской и малую часть Пензенской областей) и занимает площадь 278 тыс. км² с численностью населения 10.7 млн человек. Сток Нижней Волги регулируется Саратовским и Волгоградским водохранилищами. Здесь расположено более 800 тыс. га орошаемых угодий, на которых выращиваются теплолюбивые сельскохозяйственные культуры, широко развито искусственное воспроизводство ценных пород рыб наряду с наличием естественных нерестилищ. Промышленность представлена в основном машиностроением, топливной и химической отраслями.

За последние 30 лет кардинально изменились социально-экономические и технологические условия производства во всех основных отраслях производства в бассейне Волги. Существенно снизился объем водопотребления и водоотведения, состав сточных вод, объем сброса загрязняющих веществ. Произошли огромные изменения в жилищно-коммунальном хозяйстве, промышленности, сельском хозяйстве, приведшие к существенной трансформации экологической ситуации в бассейне. Были приняты программы и проекты по улучшению экологической обстановки. Все эти вопросы и являются предметом исследования настоящей работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных материалов использовались данные Росводресурсов по разнообразным водохозяйственным показателям, собранные по статистической форме 2-ТП (водхоз) и опубликованные в различных сборниках, и данные автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов. Для оценки качества поверхностных вод анализировались материалы министерств и департаментов экологии и природных ресурсов, опубликованные в докладах о состоянии и охране окружающей среды на территории РФ и регионов бассейна Волги, и материалы Роспотребнадзора по санитарно-химическим и микробиологическим показателям в водоемах. Также использовались данные региональных ФГБУ «Управление мелиорации земель и сельскохозяйственного водоснабжения» — показатели по оценке и учету мелиоративного состояния орошаемых сельскохозяйственных угодий и технического состояния оросительных систем (мелиоративные кадастры), отдельные научные публикации.

В соответствии с поставленными задачами исследование проведено на основе системного подхода с использованием следующих методов: 1) аналитического (сбор и систематизация первичной информации по количественным и качественным характеристикам мелиоративного состояния орошаемых угодий и технического состояния оросительных систем, продуктивности угодий); 2) специальных (на основе собранных материалов были составлены таблицы, построены диаграммы и карты); 3) статистической обработки данных и сравнительного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ водопотребления и водоотведения в регионах бассейна Волги целесообразно проводить в разрезе крупных блоков отраслей — промышленности, сельского и жилищно-коммунального хозяйства, каждый из которых имеет свою специфику водопользования.

Динамика водопотребления и эффективность использования воды в отдельных отраслях

Снижение объемов забора свежей воды и сбросов сточных вод произошло во всех отраслях, но с разной степенью интенсивности. Среди отраслей экономики бассейна наиболее водозатратна промышленность. В 2021 г. на ее долю приходилось 54% общего водопотребления, хотя еще в середине 1990-х годов (период резкого спада промышленного производства) этот показатель не превышал 49% (Демин, Исмаилов, 2003).

В 1990 г. забор пресной воды из водных объектов бассейна Волги составлял 37.0 км³, но к 2021 г. в результате трансформации социально-экономических условий в России этот показатель снизился до 16.0 км³, или в 2.3 раза. Доля бассейна Волги во всем водопотреблении России снизилась с 31.9% в 1990 до 24.9% в 2021 г., что говорит об ускоренном снижении антропогенной нагрузки в этом бассейне по сравнению с другими регионами России.

В 1980-е годы потребление воды промышленностью находилось на уровне 17–18 км³, несмотря на бурный рост производства во всех ее отраслях. Такая стабилизация связана с активным введением мощностей оборотного и повторно-последовательного водоснабжения — за 10 лет объем используемой оборотной воды увеличился на 50%. Наибольшие темпы роста мощностей оборотного водоснабжения отмечались на Верхней Волге (61%), наименьшие — на Каме (35%).

С 1990 по 2021 г. использование свежей воды в бассейне Волги на производственные нужды со-

Таблица 2. Динамика коэффициента водооборота за 1990–2021 гг., %

Бассейн	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2021 г.
Верхняя Волга	66.6	72.3	70.0	71.5	74.7	88.0	83.1	81.6
Кама	80.9	80.8	80.7	78.5	81.2	81.4	87.0	86.6
Нижняя Волга	93.1	93.9	94.5	94.8	93.5	94.5	95.1	95.1
Волга в целом	79.5	81.8	81.3	81.5	81.3	87.9	87.6	86.7

Рассчитано автором.

кратилось с 17.8 до 7.2 км³, оборотной и повторно-последовательной — с 69.2 до 47.2 км³, а суммарное водоснабжение в промышленности — с 87.0 до 54.4 км³ (Водные ..., 2010, 2019)². Коэффициент водооборота (отношение объема оборотного и повторно-последовательного водопотребления к валовому водопотреблению на производственные нужды) в целом по бассейну Волги за этот период вырос с 79.5 до 86.7%.

Внедрение оборотного водоснабжения является одним из самых эффективных мероприятий по снижению потребления свежей воды. В середине 1990-х годов ставилась задача довести его долю в промышленности бассейна Волги в ближайшие 10–15 лет до 85–90% (Возрождение ..., 1996). Эти планы не были выполнены в намеченные сроки, а осуществились гораздо позже. В настоящее время наиболее высокий коэффициент водооборота отмечается на Нижней Волге (95.1%), что объясняется значительным развитием здесь топливной, металлургической и химической отраслей, в которых в соответствии с технологией производства наиболее широко применяется оборотное водоснабжение. В бассейне Камы этот показатель составляет 86.6%, в бассейне Верхней Волги — 81.6% (табл. 2).

В результате особенностей климатических и почвенных условий орошаемое земледелие наиболее развито в засушливых регионах нижнего течения Волги. В современных условиях на долю Верхней Волги приходится ~30% орошаемых земель бассейна Волги, Камы ~10%, Нижней Волги ~60%. Что касается объемов воды, использованных для нужд орошения, то здесь картина еще более контрастна. На уровне 2020 г. >97% объема водопотребления было использовано на Нижней Волге, 2% на Верхней Волге и <1% в бассейне Камы.

Орошаемое земледелие было одним из ведущих и наиболее динамично развивающихся водопотребителей в бассейне. С 1970 по 1990 г. площадь орошаемых земель возросла с 0.32 до

2.13 млн га, но после сокращения в кризисные 1990-е годы стабилизировалась на уровне 1.4–1.5 млн га и лишь в последние пять лет стала чуть-чуть расти. Резко выросла площадь орошаемых земель, не используемых в сельскохозяйственном производстве в связи с высоким уровнем грунтовых вод и засолением почв. Из-за неисправности оросительных систем, отсутствия поливной техники, дороговизны услуг водохозяйственных организаций площадь фактически политых земель в бассейне Волги снизилась с 1530 тыс. га в 1990 до 717 тыс. га в 2000 и 467 тыс. га в 2021 г. (Мелиоративное ..., 2001; Показатели ..., 1991)³.

В бассейне Камы за 31 год площадь фактически политых земель снизилась в 5.5 раз, на Нижней Волге — в 2.3 раза, на Верхней Волге — в 1.9 раза. Существенно снизились объемы воды, используемой на орошение. Если в 1990 г. на нужды регулярного и лиманного орошения расходовалось 3.68 км³, то в 2021 г. было использовано 0.63 км³ воды, или в 5.5 раз меньше. Произошло это как из-за резкого сокращения поливаемых площадей, так и за счет снижения количества поливов.

Площадь орошаемых земель России, которые не поливаются, возросла с 0.8–1 млн га в начале 1990-х годов до 3 млн га. Если в 1990 г. доля не политых по различным причинам орошаемых земель (из-за их реконструкции, ввода в эксплуатацию после начала вегетационного сезона, низкой водообеспеченности и т.д.) в среднем по бассейну Волги составляла 29%, то к 2021 г. он повысился до 68%. Ежегодно из-за неисправности оросительной сети и поливной техники, резкого удорожания стоимости электроэнергии и услуг водохозяйственных организаций не поливается в большинстве регионов Камы 50–80% орошаемых земель. Еще хуже ситуация в бассейне Верхней Волги. Здесь в большинстве регионов не поливается 70–90% земель, числящихся в составе орошаемых, а в некоторых регионах поливается лишь каждый двадцатый гектар с оросительной сетью. Несмотря на все трудности, в большинстве регионов Нижней Волги ежегодно поливается

² Данные наблюдений за объемом вод при водопотреблении и водоотведении на всех водных объектах (по форме 2-ТП (водхоз)) // Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=513> (дата обращения 16.05.2023).

³ Показатели по оценке и учету мелиоративного состояния орошаемых сельскохозяйственных угодий и технического состояния оросительных систем. <https://inform-raduga.ru/fgbu> (дата обращения 16.05.2023).

40–60% орошаемых земель, хотя еще в конце 1990-х годов этот показатель, например, в Астраханской области доходил до 98%.

В последние годы в мелиоративном комплексе России наметились положительные сдвиги: улучшилось и приобрело большую стабильность федеральное финансирование, возросли размеры финансового участия в мелиорации земель местных органов и сельских товаропроизводителей, снизились темпы списания мелиорируемых земель. Стала понемногу расти и площадь орошаемых земель в бассейне Волги.

Жилищно-коммунальное хозяйство удовлетворяет потребность в воде населения, коммунальных, транспортных и прочих непромышленных предприятий. Ситуация с питьевым водоснабжением в бассейне Волги достаточно тревожная. Значительное число жителей использует недоброкачественную питьевую воду. До сих пор почти 10% горожан и около 45% сельчан пользуются водой из колодцев, родников, водоразборных колонок, а не водопровода.

Максимальное значение объема использования воды на хозяйственно-питьевые нужды в бассейне Волги было отмечено в 1991 г. – 6.94 км³. В последующие годы оно постоянно снижалось: 6.44 км³ в 2000 г., 6.03 км³ в 2005 г., 4.6 км³ в 2010 г., 3.78 км³ в 2015 г., 3.43 км³ в 2018 г. В самое последнее время объем водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды стабилизировался. В среднем по бассейну с 2000 по 2018 г. среднесуточное водопотребление 1 жителя (городского и сельского) снизилось с 289 до 155 л, или на 46.5%. Впечатляющие успехи по снижению водопотребления достигнуты в Москве – с 438 до 145 л/сут, или в 3 раза. Наряду с прочими, одной из основных причин этого является реализация программы по оснащению жилищного фонда приборами учета воды.

Динамика водоотведения и качества сточных вод

В результате сокращения водопотребления в жилищно-коммунальном, сельском хозяйстве и промышленности, сброс сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод в поверхностные водные объекты в целом по бассейну Волги сократился за 31 год с 22.3 до 10.3 км³ (в 2.2 раза). На бассейн Верхней Волги приходится около 2/3 всего объема водоотведения в бассейне Волги. Значительную часть отводимых после использования вод составляют загрязненные сточные воды. Их доля в общем объеме отводимых сточных вод в период экономического кризиса чуть выросла, но с 2000 г. сократилась с 48 до 43.4% в 2021 г.

В бассейне р. Оки за 1990–2021 гг. общий сброс сточных вод сократился в 2.5 раза, в бассейне р. Москвы – в 1.8 раза, в бассейне р. Клязьмы – в

3.2 раза, а в бассейне р. Суры – в 1.8 раза. Естественно, что сброс загрязненных сточных вод также заметно сократился. Однако на всех реках Верхней Волги наблюдается неблагоприятное соотношение загрязненных и нормативно-чистых вод. Так, в бассейне р. Оки доля загрязненных сточных вод за 31 год выросла с 66 до 77%, а на ее крупнейшем притоке р. Москве – с 78 до 83%. Очень сильно были загрязнены сточные воды в бассейне р. Клязьмы, где доля загрязненных вод до 2018 г. не опускалась ниже 85%, но в последнее время он заметно снизился. В бассейне р. Суры доля загрязненных сточных вод сократилась с 65 в 2000 до 47% в 2018 г. (рис. 1).

За 1990–2021 гг. объем сброса сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод в водные объекты бассейна Камы снизился с 5.11 до 2.27 км³ (2.2 раза). При этом доля загрязненных сточных вод заметно снизилась (с 42.5 до 30.6%). На всех главных притоках Камы наблюдается неблагоприятное соотношение загрязненных и нормативно-чистых вод. Так, в бассейне р. Чусовой доля загрязненных сточных вод за 31 год выросла с 55 до 76%, в бассейне р. Вятки снизился всего на 6 процентных пункта. За этот же период в бассейне р. Белой доля загрязненных сточных вод снизилась с 69.4 до 47.5%.

В бассейне Нижней Волги объем сброса сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод в водные объекты также заметно сократился. Самое большое сокращение объема водоотведения наблюдалось в Оренбургской и особенно Астраханской областях. Вызвано это прежде всего резким сокращением объема коллекторно-дренажных вод, отводимых с орошаемых земель.

Основной объем загрязненных сточных вод в бассейне Волги в 2021 г. сбрасывался предприятиями по водоснабжению, водоотведению, сбору и утилизации отходов (59%), а также обрабатывающими производствами (16%), в первую очередь химическими, целлюлозно-бумажными и металлургическими.

К нормативно-чистым условно относят воды охлаждения с предприятий и коллекторно-дренажные воды с орошаемых и осушаемых земель. Фактически они наносят определенный ущерб гидрохимическому режиму водных объектов. Воды охлаждения, имея повышенную температуру, содержат и некоторое количество загрязняющих веществ, а коллекторно-дренажные воды несут в себе пестициды, соединения азота и фосфора. В целом по бассейну Волги нормативно-чистые воды составляют около 50% объема суммарного водоотведения (Демин, 2017).

В настоящее время большая часть загрязненных сточных вод сбрасывается в водоприемники без очистки или недостаточно очищенными. В целом по бассейну Волги объем сбрасываемых за-

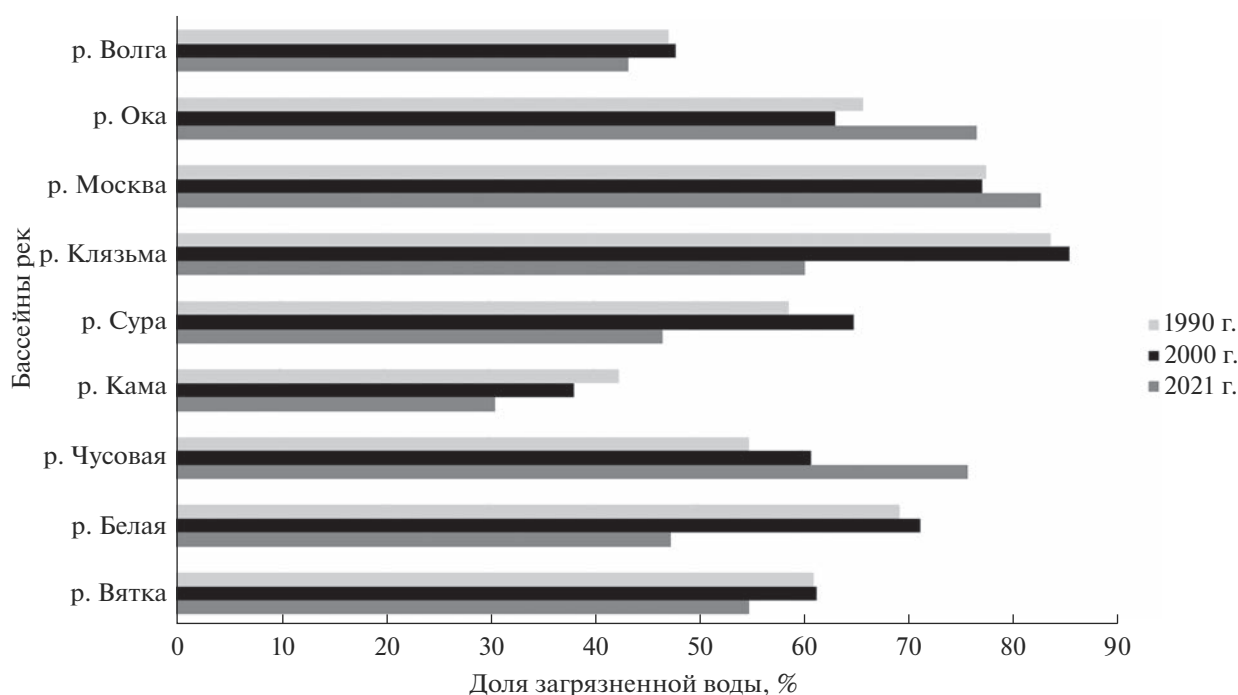


Рис. 1. Доля загрязненной воды в общем объеме сточной воды в бассейнах р. Волги и ее крупных притоков, %.

грязненных сточных вод с 1990 по 2021 г. снизился с 11.1 до 4.5 км³, или почти в 2.5 раза. При этом объем нормативно очищенных сточных вод на сооружениях очистки за этот период сократился в значительно меньшей степени — с 1072 до 942 млн м³, или в 1.14 раза. В бассейне р. Оки он сократился в 1.7 раза, бассейне р. Москвы — в 1.5 раза, бассейне р. Камы — в 1.11 раза, бассейне Чусовой — в 2.7 раза, в бассейне р. Вятки — в 1.7 раза.

В конце 2018 г. был утвержден Федеральный проект “Оздоровление Волги” разработанный в рамках национального проекта “Экология” в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 “О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года”. Одной из главных его целей является сокращение сброса загрязненных сточных вод за счет существенного прироста мощности очистных сооружений, обеспечивающих нормативную очистку сточных вод⁴. Значительное финансирование этих мероприятий привело к неплохим результатам. Всего за три года (2019–2021 гг.) объем нормативно очищенных сточных вод в бассейне Волги вырос с 589.2 до 941.3 млн м³, или в 1.6 раза. В бассейне р. Оки он вырос в 3.6 раза, в том числе на ее крупнейших притоках рр. Москве и Клязьме в 2.7 и 6.3 раза. В бассейне р. Камы объем нормативно очищенных

сточных вод вырос только в 1.2 раза, но на ее крупных притоках рр. Белая и Вятка соответственно в 3.6 и 2.9 раза.

В целом доля нормативно очищенной воды в общем объеме сточных вод, требующих очистки, за 31 год в бассейне Волги выросла почти в 2 раза — с 8.8 до 17.3%, т.е. до нормативов сейчас очищается только каждый шестой кубометр загрязненной воды. При этом в бассейнах рр. Ока и Москва эта доля выросла крайне незначительно, в бассейне р. Чусовая осталась на прежнем уровне. Однако в бассейнах рр. Суры, Камы и ее притоков Белой и Вятки доля нормативно очищенной воды выросла очень существенно — на 16–24 процентных пункта. Наибольший прирост этой доли произошел в бассейне р. Клязьмы — с 1 до 34% (рис. 2).

Важную роль в интенсификации процесса снижения поступления ЗВ в водные объекты со сточными водами должно было сыграть увеличение ввода в эксплуатацию мощностей очистных сооружений. За период 2001–2005 гг. в среднем за год мощность станций для очистки сточных вод в России увеличивалась на 0.6 млн м³ воды в сут. За последующие 5 лет вводилось в среднем по 0.84 млн м³ мощностей в год. За период 2011–2015 гг. ввод мощностей по годам был очень неравномерен, но в среднем за этот период ежегодно вводилось станций для очистки сточных вод мощностью 1.3 млн м³ воды в сут или в 2.2 раза больше, чем в начале века (Охрана ..., 2001, 2006, 2010). В 2016–2018 гг. темпы ввода мощностей по очистке сточных вод

⁴ Паспорт федерального проекта “Оздоровление Волги”. <https://minstroyrf.gov.ru/docs/140248/> (дата обращения 17.05.2023).

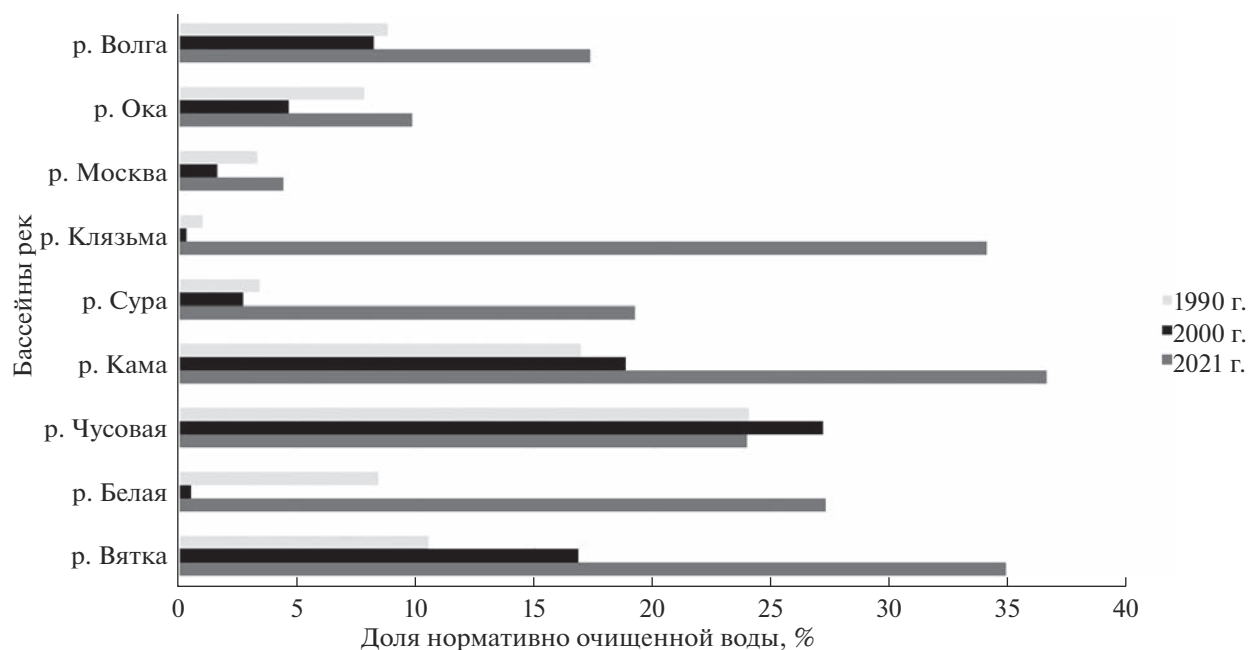


Рис. 2. Доля нормативно очищенной воды в общем объеме сточных вод, требующих очистки, %.

вновь снизились — в среднем за год было введено 0.79 млн м³ мощностей, но в 2019–2021 гг. ежегодно вводилось 1–1.8 млн м³ мощностей (1.27 млн м³ в среднем).

Низкая эффективность работы очистных сооружений связана с устаревшим технологическим оборудованием и традиционными схемами очистки, а также с нарушениями режимов очистки сточных вод. Основные мощности очистных сооружений сосредоточены в ЖКХ. Необходимо отметить, что 60% сооружений этой отрасли перегружены, 40% эксплуатируются 30 и более лет и требуют срочной реконструкции. Кроме того, 2% городов, 16% поселков городского типа и 95% сельских населенных пунктов не имеют централизованных систем канализации. В 2018 г. 45% имеющейся канализационной сети нуждалось в замене.

Сброс загрязняющих веществ в составе сточных вод

В связи со снижением объемов отводимых сточных вод, изменением их качественного состава, ростом мощности очистных сооружений значительный интерес представляет анализ динамики сбросов ЗВ (Водные ..., 2010, 2019; Воды ..., 1991)⁵. По большинству ЗВ отмечается суще-

ственное снижение их сброса в водные объекты в 2021 по сравнению с 1990 г. (табл. 3).

В целом по бассейну Волги наибольший эффект достигнут в снижении сброса железа и меди — соответственно в 54 и 51 раз. Количество хлоридов в составе сточных вод сократилось за 31 год в бассейне Волги в 40 раз, фенолов — в 30 раз, а сброс сульфатов, нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ) — от 11 до 15 раз. Биохимическое потребление кислорода (БПК), являющееся одним из важнейших критериев уровня загрязнения водоема органическими веществами, сократилось в бассейне Волги за этот период более чем в 8 раз. Масса сухого остатка, сбрасываемого со сточными водами, а также азота аммонийного и фосфатов снизилась в бассейне Волги примерно в 4 раза.

Единственный показатель, по которому отмечается рост — это нитраты. Количество сбрасываемых со сточными водами нитратов росло как в целом в бассейне Волги, так и в бассейнах ее главных притоков до 2012–2013 гг., после чего стало постепенно сокращаться. Всего же за период 1990–2021 гг. сброс нитратов в бассейне Волги вырос в 4.5 раза, в том числе в бассейне Оки в 4.8 раза, а в бассейне Камы — в 2.9 раза.

На крупнейших притоках р. Волги отмечается существенно разная картина по снижению сброса важнейших ЗВ. В бассейне р. Оки наибольший эффект достигнут в снижении сброса сульфатов и хлоридов — в 228 и 172 раза. Существенно снизился сброс меди, нефтепродуктов, фенолов — соответственно в 49, 24 и 19 раз.

⁵ Данные наблюдений за объемом вод при водопотреблении и водоотведении на всех водных объектах (по форме 2-ТП (водхоз)) // Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=513> (дата обращения 16.05.2023).

Таблица 3. Динамика сброса загрязняющих веществ в составе сточных вод в бассейнах рек

Загрязняющее вещество	1990 г.	2000 г.	2009 г.	2018 г.	2021 г.	1990 к 2021, %
Бассейн р. Волги						
БПК полный, тыс. т	301.9	115.9	60.9	36.3	37.2	812
Сухой остаток, тыс. т	11886	5419	4904	3569	3090	385
Сульфаты, млн т	50.78	0.792	0.609	1.341	3.474	1462
Хлориды, млн т	52.05	1.715	1.669	2.607	1.308	3979
Азот аммонийный, тыс. т	102.3	36.98	24.29	25.31	24.69	414
Нитраты, тыс. т	39.29	131.7	203.6	173.1	176.1	22
Фосфаты (по фосфору), тыс. т	20.030	12.030	8.722	6.223	5.602	358
СПАВ, тыс. т	5.385	1.006	0.599	0.501	0.469	1148
Нефтепродукты, тыс. т	13.70	2.500	0.930	0.864	1.035	1324
Железо, т	55648	3424	2926	716.8	1038	5361
Медь, т	373.8	57.67	38.13	8.610	7.380	5065
Фенолы, т	91.3	12.400	3.200	2.760	3.090	2955
Бассейн р. Оки						
БПК полный, тыс. т	71.4	35.97	23.20	15.39	18.77	380
Сухой остаток, тыс. т	2976	1854	1206	462.0	495.8	600
Сульфаты, млн т	45.63	0.259	0.209	0.187	0.200	22815
Хлориды, млн т	48.24	0.33	0.26	0.249	0.281	17167
Азот аммонийный, тыс. т	42.45	16.53	9.340	13.99	13.33	318
Нитраты, тыс. т	14.99	89.77	88.47	73.16	72.58	21
Фосфаты (по фосфору), тыс. т	7.988	5.926	3.708	2.612	2.664	300
СПАВ, тыс. т	1.687	0.281	0.222	0.221	0.220	767
Нефтепродукты, тыс. т	5.900	0.91	0.43	0.232	0.243	2428
Железо, т	3256	1403	624	249,8	380.4	857
Медь, т	156.0	31.95	12.360	3.600	3.180	4906
Фенолы, т	25.60	2.870	0.59	0.599	1.314	1948
Бассейн р. Камы						
БПК полный, тыс. т	133.8	42.21	17.87	8.020	6.580	2033
Сухой остаток, тыс. т	6451	2328	2485	2303	1892	341
Сульфаты, млн т	0.898	0.202	0.174	0.139	0.127	707
Хлориды, млн т	2.773	1.138	1.235	2.214	0.866	320
Азот аммонийный, тыс. т	27.22	8.636	6.529	2.679	2.581	1055
Нитраты, тыс. т	14.020	25.14	45.74	42.53	41.17	34
Фосфаты (по фосфору), тыс. т	6.340	2.483	1.654	1.151	1.026	618
СПАВ, тыс. т	1.731	0.397	0.165	0.123	0.0131	13214
Нефтепродукты, тыс. т	4.500	0.89	0.28	0.446	0.0885	5085
Железо, т	50770	2776	1888	173.9	97.76	51933
Медь, т	108.9	12.150	21.100	2.175	1.201	9067
Фенолы, т	53.5	7.400	1.600	0.441	0.456	11732

В бассейне р. Камы наибольший эффект достигнут в снижении сброса железа, СПАВ и фенолов — соответственно в 519, 132 и 117 раз. Произошло очень большое сокращение сброса меди, нефтепродуктов, органических веществ (БПК) — соответственно в 91, 51 и 20 раз. Сброс азота аммонийного снизился в 11 раз.

Таким образом, хотя объем отводимых сточных вод снизился в бассейне Волги в 2.3 раза, а объем сточных вод, прошедших очистку, снизился почти в 2 раза, количество основных сброшенных ЗВ сократилось в 4–50 раз. Это свидетельствует о том, что несмотря на все вышеперечисленные недостатки в работе очистных сооружений, достигнут существенный эффект от проведения водоохраных мероприятий.

Снизилась также и рассредоточенная по водосборной территории сельскохозяйственная нагрузка. Достаточно отметить, что количество вносимых органических удобрений сельскохозяйственными организациями за период 1990–2018 гг. сократилось в целом по бассейну Волги со 173.0 до 25.6 млн т, а минеральных удобрений с 42.5 до 7.5 млн ц действующего вещества, или в 6.7 и 5.7 раз соответственно. Количество пестицидов, поставляемых сельскохозяйственным производителям, за указанный период снизилось в 3.5 раза.

Изменение качества воды в водных объектах

Состояние качества воды водных объектов, уровень их загрязненности, оказывает прямое влияние на экологическую обстановку в России. Сложившаяся практика крайне низкого финансирования водохозяйственных и водоохраных мероприятий в 1990–2000-е годы обострила проблему обеспечения населения и отраслей экономики качественной водой.

Исходя из приведенных выше данных о снижении объема загрязненных сточных вод и сброса ЗВ в водные источники можно было бы ожидать ощутимого улучшения их качества. В бассейнах ряда рек по некоторым ингредиентам это произошло. Однако по большинству речных бассейнов состояние качества воды остается неудовлетворительным. Этот эффект вызван действием ряда неконтролируемых (рассредоточенных) источников загрязнения, а также источников вторичных (накопленных) загрязнений. По многим оценкам именно они вносят основной вклад в загрязнение водных объектов (Диффузное ..., 2020).

Неконтролируемые источники находятся, в основном, вне системы контроля со стороны государственных органов, характеризуются нестационарностью режима и рассредоточенным характером поступления ЗВ в водные источники. К ним относятся: поверхностный смыл с селитеб-

ных территорий, промплощадок, сельскохозяйственных угодий, а также водный транспорт, карьерные разработки, рекреация, свалки и захоронения бытовых отходов, атмосферные выбросы городов, промышленных объектов, транспорта, участвовавшие случаи аварий и катастроф, поступление ЗВ с подземным стоком и пр.

Анализ динамики качества поверхностных вод выполнен на основе статистической обработки данных гидрохимической сети Росгидромета в 2021 г. по наиболее характерным для каждого водного объекта показателям (О состоянии ..., 2022). Наиболее распространенными ЗВ поверхностных вод остаются нефтепродукты, фенолы, легкоокисляемые органические вещества, соединения тяжелых металлов, аммонийный и нитритный азот.

В последнее десятилетие вода Верхне-Волжских водохранилищ, за исключением единичных створов, характеризуется как “загрязненная”. К наиболее характерным загрязняющим веществам здесь относятся органические вещества, соединения железа, меди, цинка, реже — фенолы. Качество воды большинства притоков водохранилищ варьирует от “загрязненных” до “грязных”. Комплексный анализ основных блоков экологического состояния Ивановского водохранилища показывает ухудшение качества воды и деградацию водоема (Веницианов, Кирпичникова, 2016). В водах Чебоксарского водохранилища характерными загрязнениями на протяжении многих лет являются соединения меди, железа и органические вещества (по ХПК). В последние годы наблюдалось увеличение среднегодовых концентраций аммонийного и нитритного азота.

Степень загрязненности воды р. Оки изменяется по течению. На участке реки, протекающей по территориям Орловской, Калужской и Тульской областей, в течение многолетнего периода вода оценивалась как “загрязненная”. В пределах Московской области ниже г. Серпухова качество воды ухудшалось до “грязной”. Снижение качества воды реки ниже г. Коломны обусловлено не только воздействием загрязненных сточных вод города, но и поступлением загрязненных вод р. Москвы. Далее по течению реки вода характеризуется как “грязная”.

Загрязненность воды р. Москвы возрастает от “загрязненной” на входе в г. Москву и “грязной” как в черте г. Москвы, так и ниже по течению в створе ниже г. Воскресенска. Вода большинства притоков р. Москвы по качеству оценивается как “грязная”. На протяжении ряда лет критическими загрязняющими веществами воды как р. Москвы, так и ее притоков являются аммонийный и нитритный азот, легкоокисляемые органические вещества.

Повышение эффективности работы очистных сооружений в г. Щёлково после проведенной реконструкции способствовало улучшению качества воды р. Клязьмы на территории Московской области от “экстремально грязной” до “грязной” практически во всех створах наблюдений. Ниже по течению на территории Владимирской области вода реки стабильно оценивается как “грязная”.

Качество воды в бассейне р. Камы определяется влиянием сточных вод предприятий Соликамско-Березниковского промышленного района, бывшего Кизеловского угольного бассейна, предприятий Перми. В воде отмечается повышенное содержание соединений марганца, железа, меди, органических веществ (по ХПК), иногда фенолов и она характеризуется многие годы как “загрязненная”. Низким качеством, как “грязная” (4 класс) продолжает характеризоваться вода притоков Камы — рр. Косвы, Северушки, Ижа. Река Чусовая из года в год наиболее загрязнена на участке ниже Первоуральска, где ее качество оценивается как “грязная”.

В большинстве створов вода р. Белой характеризуется как “загрязненная”. Хронически “грязной” сохранилась вода в створах ниже Ишимбая и Стерлитамака, где испытывает антропогенную нагрузку сточными водами предприятий химической, нефтедобывающей, пищевой промышленности, машиностроения и ЖКХ. По всей длине реки наблюдается повышенное содержание соединений марганца, на отдельных участках — соединений меди и железа.

В течение многолетнего периода в Куйбышевском и Саратовском водохранилищах преобладают “загрязненные” воды. Более высокий уровень загрязненности воды (“грязная”) чаще всего отмечается на участке Куйбышевского водохранилища в районе Казани. Характерными загрязнениями воды Куйбышевского водохранилища остаются органические вещества (по ХПК), соединения меди и марганца. На участке Саратовского водохранилища в черте Саратова вода часто характеризовалась как “грязная”.

Вода Волгоградского водохранилища и р. Волги у г. Волгограда, как и в предыдущие годы, оценивалась как “загрязненная”. К характерным загрязняющим веществам относятся органические вещества (по ХПК), соединения меди, у Волгограда к ним добавляются нефтепродукты и фенолы.

В 2019–2021 гг. по сравнению с 2008–2018 гг. вода р. Волги ниже Астрахани улучшилась от “грязной” до “загрязненной”. Характерными загрязняющими веществами были органические вещества (по ХПК и БПК₅), нефтепродукты, соединения меди, цинка, железа, молибдена. Загрязнение воды нитритным азотом с 2019 г. снижается.

Кроме того, значительный интерес представляют данные Роспотребнадзора по динамике качества вод (Охрана ..., 2010)⁶. В табл. 4 представлены характеристики состояния качества воды водоемов I категории, используемых в качестве источников питьевого и хозяйственно-бытового водопользования населения, для субъектов федерации, не менее 30% территории которых входит в бассейн Волги. В некоторых регионах Волжского бассейна число отобранных проб в водоемах I и II категории было незначительным, либо они вообще не отбирались.

Состояние источников централизованного питьевого водоснабжения и качество воды в местах водозабора изменяется медленно и продолжает оставаться неудовлетворительным. Доля неудовлетворительных проб по санитарно-химическим показателям в водоемах первой категории из 24 представленных регионов в 11 регионах даже увеличилась и на половине территорий была выше среднероссийского показателя. Особенно велико загрязнение воды по этим параметрам в настоящее время в водоемах Вологодской, Владимирской, Московской, Ярославской, Кировской, Пензенской, Ульяновской областей, Пермского края (см. табл. 4).

По микробиологическим показателям качество воды за 25 лет ухудшилось в пяти регионах. В 2021 г. доля исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по микробиологическим показателям в водоемах I категории, в шести регионах бассейна Волги выше среднероссийского показателя

Если рассматривать процесс изменения качества воды более детально (в разрезе отдельных участков бассейна Волги) и по каждому году, можно отметить, что в бассейне Верхней Волги доля неудовлетворительных проб по санитарно-химическим показателям колебалась в довольно значительных пределах (23–37%). В последние годы эта доля стала расти и превышает величину 25-летней давности. В бассейне р. Камы она также заметно растет и в 2021 г. превысила уровень 1996 г. на 15 процентных пунктов. Отрадно, что в бассейне Нижней Волги доля неудовлетворительных проб неуклонно и существенно сокращается (рис. 3).

По микробиологическим показателям во всех подбассейнах отмечается снижение доли неудовлетворительных проб, однако на обширной территории Верхней Волги она в настоящее время все еще превышает среднероссийский уровень. Наиболее существенными темпами улучшается качество воды по этим показателям на Нижней

⁶ Сайт Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. <http://www.rospotrebnadzor.ru> (дата обращения 18.05.2023).

Таблица 4. Доля исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по санитарно-химическим и микробиологическим показателям, в водоемах I категории регионов бассейна р. Волги, %

Субъект Федерации	Санитарно-химические показатели				Микробиологические показатели			
	1996 г.	2005 г.	2015 г.	2021 г.	1996 г.	2005 г.	2015 г.	2021 г.
Вологодская область	41.2	46.8	16.2	43.1	23.9	17.9	7.1	7.2
Владимирская область	55.9	30.2*	80.0*	49.2	40.4	39.6*	41.5	35.0
Ивановская область	16.5*	4.4	31.3*	22.8	60.9*	34.4	22.8	5.3
Калужская область	9.7*	48.7*	25.0*	10.5	24.5*	14.9	40.7*	26.2
Костромская область	30.7	12.2	12.9*	13.9	22.6	16.2	9.7	13.7
Московская область	26.5	39.0	28.6	41.5	18.7	34.8	25.0	36.6
Рязанская область	22.1	4.5*	28.1*	9.1	49.4	50.4	1.9	3.6
Тверская область	23.0	38.0	26.6	21.8	16.9	20.6	19.7	7.0
Ярославская область	16.0	35.0	21.1	71.8	25.5	18.2	14.2	55.4
Республика Чувашия	24.7	7.3*	18.3	29.0	13.3*	20.4*	8.1	4.3
Кировская область	56.7	82.8	45.0	43.2	31.6	36.1	24.2	11.2
Нижегородская область	29.6	29.8	38.2*	9.9	7.4	24.2	48.2*	24.8
Республика Татарстан	15.9	32.7	22.0*	13.1	8.7	13.1	3.1*	5.4
Астраханская область	14.1	16.0	3.9	2.2	12.1	12.6	5.2	2.5
Волгоградская область	20.7*	8.9	35.2	5.9	21.3	15.2	3.6	7.8
Оренбургская область	14.4	12.3	0.7	—	14.1	11.5	0.8	1.7
Пензенская область	63.6	43.2*	6.7*	44.4	26.4	7.9*	36.8*	71.4
Самарская область	35.85	51.0*	21.9*	11.8	18.0	39.1*	26.9	5.6
Саратовская область	14.2	23.0	12.1	22.4	29.7	19.6	6.7	8.5
Ульяновская область	44.8	36.4*	34.9	40.6	24.8	16.7	33.3*	—
Республика Башкортостан	13.6	19.7	26.8*	50.0	21.1	5.9	7.5	9.8
Удмуртская Республика	26.4	30.4	21.9*	30.9	11.9	10.9	9.5	9.6
Пермский край	17.9	39.6	57.5	45.4	21.3	35.9	7.4	9.3
Челябинская область	18.8	28.6	31.8	26.6	12.0	6.7	11.3	4.3
Россия	24.3	28.0	23.3	25.9	22.1	23.7	16.0	15.1

Примечание. * Общее число исследованных проб меньше 100.

Волге — доля неудовлетворительных проб снизилась с 18–20 до 3–7% в последние годы (рис. 4).

Качество воды водоемов II категории, находящихся в местах рекреации населения, отличается от качества воды водоемов I категории. Доля исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по санитарно-химическим показателям, в водоемах II категории по тому же списку регионов бассейна Волги, которые представлены в табл. 4, в среднем ниже, чем доля проб в водоемах I категории. Качество воды водоемов II категории за 25 лет ухудшилось в пяти регионах, а в одном осталось на прежнем уровне. На половине территорий волжского бассейна качество воды по этому показателю было хуже, чем в среднем по России.

По микробиологическим показателям качество воды водоемов II категории значительно уступает качеству воды водоемов I категории —

доля неудовлетворительных проб существенно выше. Качество воды за 25 лет ухудшилось в семи регионах и в четырех осталось на прежнем уровне. На половине территорий бассейна качество воды по этому показателю было хуже среднероссийского уровня. Особенно резко микробиологическое загрязнение водоемов нарастало во Владимирской, Ярославской, Пензенской областях, Пермском крае.

В водоемах II категории, по которым отбирается в 3–4 раза больше проб, диапазон изменения качества воды более широк, чем в водоемах I категории. В бассейне Верхней Волги и Камы за 25 лет ситуация с долей неудовлетворительных проб по санитарно-химическим показателям заметно изменилась — она снизилась с 25–30 до 15–20%. На Нижней Волге доля таких проб снизилась с 20–22 до 8–12%.

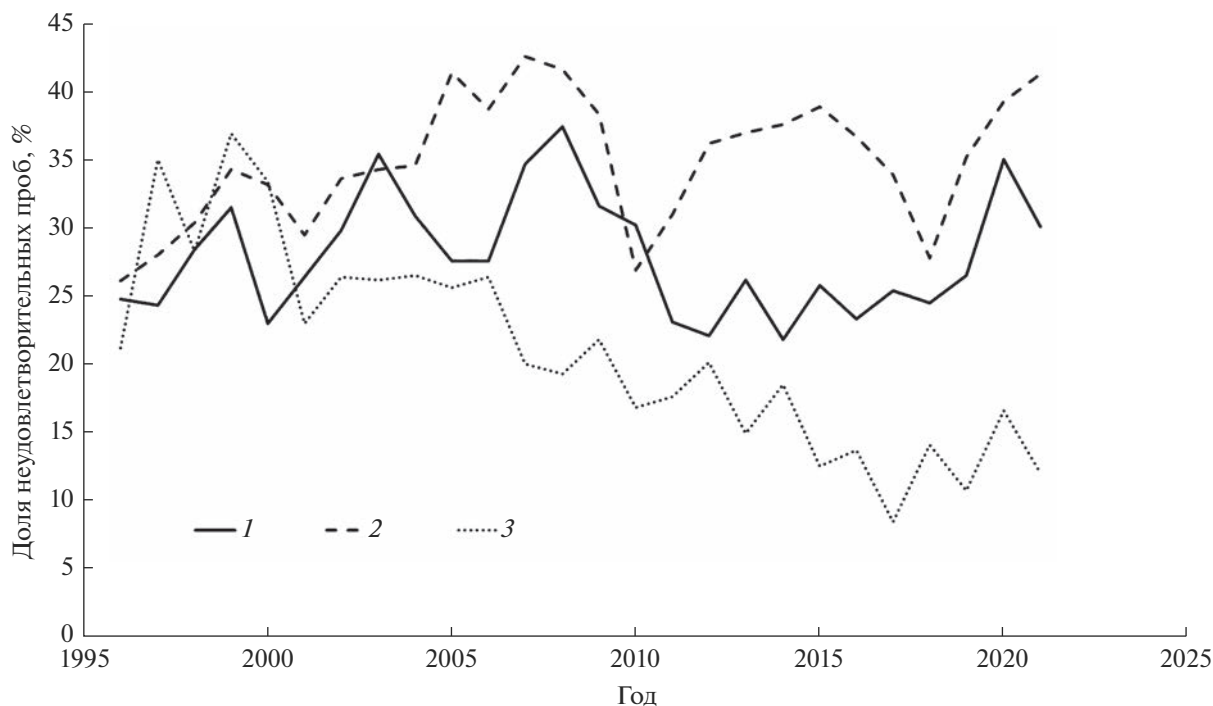


Рис. 3. Изменение доли исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по санитарно-химическим показателям, в водоемах I категории подбассейнов Волги, %: 1 – Верхняя Волга, 2 – Кама, 3 – Нижняя Волга.

По микробиологическим показателям доля неудовлетворительных проб в бассейне Верхней Волги снизилась с 25–27 до 22–24%, а в бассейне р. Камы выросла с 15–17 до 17–21%. На Нижней Волге по этим показателям доля неудовлетворительных проб снизилась с 22–24 до 11–14%.

Итак, анализ данных гидрохимической сети Росгидромета, а также данных Роспотребнадзора показывает, что степень загрязненности воды реки в целом устойчиво сохраняется на уровне прошлых лет. Практически все водные объекты бассейна Волги подвержены антропогенному воздействию. Неблагополучно состояние малых рек, особенно в зонах крупных промышленных центров, из-за поступления в них с поверхностным стоком и отработанными сточными водами большого количества ЗВ. В сельской местности значительный ущерб малым рекам наносится из-за нарушения режима хозяйственной деятельности в водоохранных зонах и смыва в водотоки органических и минеральных веществ, пестицидов, частиц почвы в результате водной эрозии. Крупными загрязнителями окружающей природной среды являются животноводческие комплексы.

Несмотря на существенное снижение контролируемой массы поступающих ЗВ, улучшения качества вод в целом не наблюдается, что можно объяснить следующими причинами: значительными запасами ЗВ в почвах, грунтах и донных отложениях;

продолжающимся увеличением загрязненности урбанизированных территорий; усиливающейся интенсивностью эрозионных процессов и увеличением твердого стока в поверхностные водные объекты; участвующим нарушением водного законодательства; ростом количества чрезвычайных ситуаций в результате аварий и катастроф в промышленности, ЖКХ и на трубопроводном транспорте, что ведет к увеличению накопленного ущерба (Демин, 2011).

Сток воды и наносов в сельскохозяйственной зоне составляет в реки и водоемы до 80–90% фосфора, азота и пестицидов. Однако применение одного из важнейших мероприятий по охране земель и вод, каковым является создание противоэрозионных лесных насаждений, резко сокращается. По данным государственной статистической отчетности (форма № 1-ЛХ) создание противоэрозионных лесных насаждений на землях сельскохозяйственного назначения в России с 2000 по 2018 г. снизилось в 8 раз. В подавляющем большинстве регионов бассейна Волги, за исключением республики Татарстан, полностью прекратили высаживать противоэрозионные насаждения. Для улучшения экологической ситуации в бассейне необходимо в кратчайшие сроки по крайней мере вернуться к объемам работ, выполняемым 15–20 лет назад, а еще лучше превысить их (Диффузное ..., 2020).

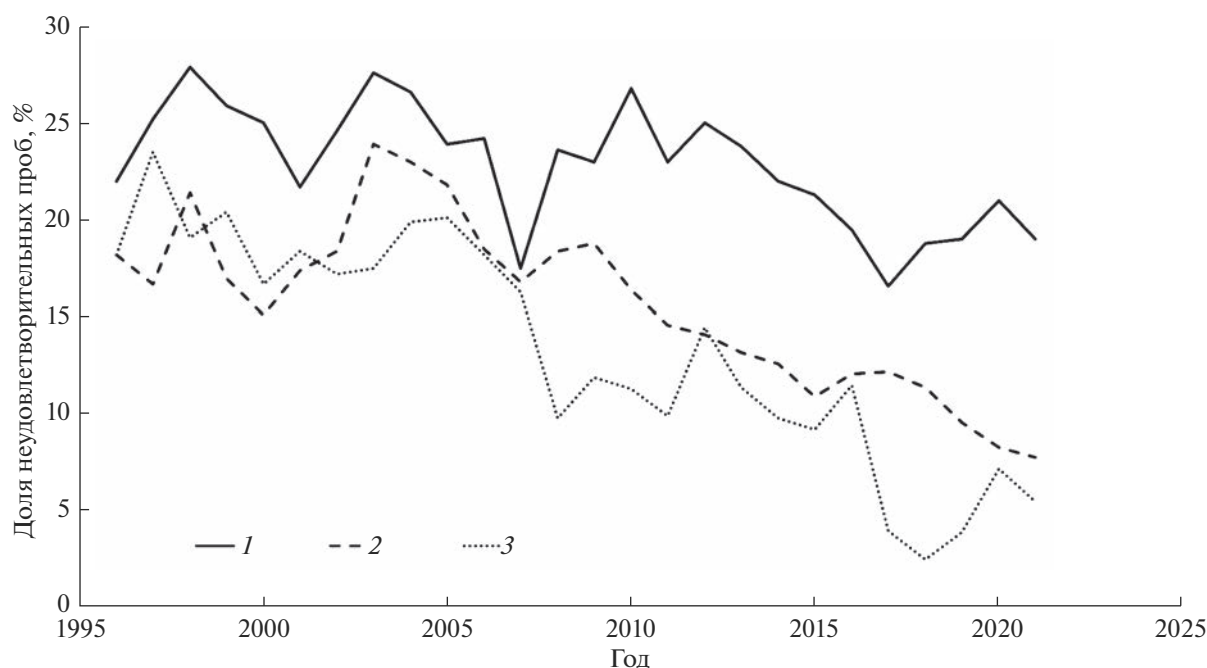


Рис. 4. Изменение доли исследованных проб, не соответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям по микробиологическим показателям, в водоемах I категории подбассейнов Волги, %: 1 — Верхняя Волга, 2 — Кама, 3 — Нижняя Волга.

В настоящее время экономические инструменты регулирования водопользования недостаточно мотивируют водопользователей к проведению водоохранных мероприятий. Современный уровень платы за сброс сточных вод очень низок, субъектам хозяйственной деятельности более выгодно осуществлять платежи за допустимые сбросы или платить незначительные штрафы за их превышение, чем снижать сброс загрязняющих веществ путем повышения эффективности очистных сооружений, внедрения малоотходных и безотходных технологий и т.п.

ВЫВОДЫ

В бассейне Волги проживает 61.3 млн человек, расположено 32% посевов сельскохозяйственных культур и 45% основных фондов отраслей экономики, производится 46.5% валовой продукции России, что определяет высокую степень антропогенной нагрузки.

В результате сокращения водопотребления в жилищно-коммунальном, сельском хозяйстве и промышленности сброс сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод в поверхностные водные объекты в целом по бассейну Волги сократился за 31 год с 22.3 до 10.3 км³. Доля загрязненных вод в общем объеме отводимых вод снизилась с 47.3% в 1990 до 43.4% в 2021 г., но в бассейнах некоторых притоков Волги она выросла.

Объем нормативно очищенных сточных вод на сооружениях очистки за этот период также сократился — с 1072 до 941 млн м³ (на 12%). До нормативов сейчас очищается только каждый шестой кубометр воды, подлежащей очистке.

Количество основных загрязняющих веществ, сброшенных со сточными водами, за 1990–2021 гг. резко снизилось. В целом по бассейну Волги сброс железа снизился в 54 раза, меди — в 51, хлоридов — в 40, фенолов — в 30 раз, нефтепродуктов и СПАВ — до 15 раз, биохимическое потребление кислорода снизилось в 8 раз. Лишь сброс нитратов вырос в 4.5 раза. Существенно снизилась также и рассредоточенная по водосборной территории сельскохозяйственная нагрузка — количество вносимых органических и минеральных удобрений, пестицидов, количество животных и сельскохозяйственной техники.

Хотя и произошел существенный прирост мощности очистных сооружений за годы действия Федерального проекта «Оздоровление Волги» (2019–2021 гг.), по 6 из 12 важнейших веществ за этот период отмечается рост загрязнений (органические вещества, сульфаты, нитриты, нефтепродукты, соединения железа, фенолы).

Несмотря на снижение контролируемой массы поступающих загрязняющих веществ, улучшения качества поверхностных и подземных вод в целом не наблюдается, что говорит о росте за-

грязнений, поступающих от диффузных источников и, возможно, донных отложений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0001 государственного задания ИВП РАН.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the theme no. FMWZ-2022-0001 of the State Assignment of the IVP RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веницианов Е.В., Кирпичникова Н.В. Современные экологические проблемы Иваньковского водохранилища — источника водоснабжения г. Москвы // Экология речных бассейнов: Труды 8-й Междунар. науч.-практ. конф. Владимир: Араим, 2016. С. 325–330.
- Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2009 году: Стат. сб. / под ред. Н.Г. Рыбальского и А.Д. Думнова. М.: НИИ-Природа, 2010. 272 с.
- Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2018 году: Стат. сб. / под ред. Н.Г. Рыбальского и В.А. Омеляненко. М.: НИИ-Природа, 2019. 274 с.
- Воды России (состояние, использование, охрана). 1986–1990 гг. Свердловск: Изд-во УралНИИВХ, 1991. 148 с.
- Возрождение Волги — шаг к спасению России / под ред. И.К. Комарова. М.—Н. Новгород: Экология, 1996. 464 с.
- Демин А.П. Использование водных ресурсов России: современное состояние и перспективные оценки. Дисс. ... д-ра геогр. наук. М., 2011. 272 с.
- Демин А.П. Сточные воды и качество воды в бассейне р. Волги (2000–2015 гг.) // Ученые записки Российского гос. Гидрометеорологического ун-та. 2017. № 48. С. 55–71.
- Демин А.П., Исмайлов Г.Х. Водопотребление и водоотведение в бассейне Волги // Водные ресурсы. 2003. Т. 30. № 3. С. 366–380.
- Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.
- Мелиоративное состояние орошаемых и осушенных сельскохозяйственных угодий и техническое состояние оросительных и осушительных систем по состоянию на 01.01. 2001 г. (мелиоративный кадастр). М.: МСХ РФ, 2001. 36 с.
- О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. 684 с.
- Охрана окружающей среды в России. 2001: Стат. сб. М.: Госкомстат России, 2001. 229 с.
- Охрана окружающей среды в России. 2006: Стат. сб. М.: Росстат, 2006. 239 с.
- Охрана окружающей среды в России. 2010: Стат. сб. М.: Росстат, 2010. 303 с.
- Показатели по оценке и учету мелиоративного состояния орошаемых сельскохозяйственных угодий и технического состояния оросительных систем по состоянию на 1 ноября 1990 г. М.: МСХ РФ, 1991. 10 с.

Water Consumption and Water Discharge in the Volga River Basin and Their Impact on Water Quality

A. P. Demin*

Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: deminap@mail.ru*

The purpose of the study is to assess the change in the volumes of water consumption and wastewater disposal in the basin of the Volga River and its main tributaries in the 1990–2021 period due to changing conditions, as well as their impact on water quality. The data of Federal Agency for Water Resources on various water management indicators and the data of the automated information system for state monitoring of water bodies were used as source materials. To assess the quality of surface waters, materials from regional environmental departments and Rospotrebnadzor were involved. The data of regional federal state budget institutions were used to assess the state of irrigated agricultural land. It was revealed, that from 1990 to 2021 freshwater intake in the basin of the Volga River decreased by 2.3 times. The water turnover ratio increased from 79.5 to 86.7%. In recent years, an increase in the area of irrigated land has begun. The average daily specific water consumption per inhabitant has decreased in all regions as a result of the introduction of water meters and water-saving equipment in housing and communal services. It was revealed that the share of polluted waters in the total volume of discharged waters decreased from 47.3% in 1990 to 43.4% in 2021, but it increased in the basins of many Volga tributaries. Only every sixth cubic meter of polluted water is now cleaned up to standards. It has been established that the amount of the main pollutants discharged with wastewater has decreased ten times over the 1990–2021 period. Although there has been a significant increase in the capacity of treatment facilities over the years of the federal project “Improvement of the Volga” (2019–2021), six of the 12 most important substances have seen an increase in pollution over this period. Despite a decrease in

the controlled mass of incoming pollutants, there is generally no improvement in surface water quality, which indicates an increase in pollution from diffuse sources and, possibly, bottom sediments.

Keywords: river basins, land irrigation, water consumption, wastewater, river water quality, pollutant discharge, treatment facilities

REFERENCES

- Demin A.P. The use of water resources in Russia: the current state and prospective assessments. *Doct. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Water Probl. Inst., Russ. Acad. Sci., 2011. 284 p.
- Demin A.P., Ismajylov G.H. Water consumption and sanitation in the Volga basin. *Water Resour.*, 2003, vol. 30, no. 3, pp. 366–380. (In Russ.).
- Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions]. Danilov-Danilyan V.I., Ed. Moscow: Russ. Acad. Sci. Publ., 2020. 512 p.
- Meliorativnoe sostoyanie oroshaemykh i osushennykh sel'skokhozyaistvennykh ugodii i tekhnicheskoe sostoyanie orositel'nykh i osushitel'nykh sistem po sostoyaniyu na 01.01.2001 g. (meliorativnyi kadastr)* [Ameliorative Condition of Irrigated and Drained Agricultural Lands and Technical Condition of Irrigation and Drainage Systems on 01.01.2001 (Reclamation Cadaster)]. Moscow: MSH RF, 2001. 36 p.
- O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu. Gosudarstvennyi doklad* [On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2021. Government Report]. Moscow: Ministry Nat. Resour. RF; MSU, 2022. 684 p.
- Okhrana okruzhayushchei sredy v Rossii. 2001: Stat. sb.* [Environmental Protection in Russia. 2001. Data Book]. Moscow: GosKomStat RF, 2001. 229 p.
- Okhrana okruzhayushchei sredy v Rossii. 2006: Stat. sb.* [Environmental Protection in Russia. 2006. Data Book]. Moscow: GosKomStat RF, 2006. 239 p.
- Okhrana okruzhayushchei sredy v Rossii. 2010: Stat. sb.* [Environmental Protection in Russia. 2010. Data Book]. Moscow: GosKomStat RF, 2010. 303 p.
- Venicianov E.V., Kirpichnikova N.V. Modern environmental problems of the Ivankovo reservoir – A source of water supply for Moscow]. In *Ekologiya rechnykh basseinov: Tr. 8-i Mezhd. Nauch.-Prakt. Konf.* [Ecology of River Basins: Proc. 8th Int. Sci.-Pract. Conf.]. Vladimir: Araim Publ., 2016, pp. 325–330. (In Russ.).
- Vodnye resursy i vodnoe khozyaistvo Rossii v 2009 godu (Statisticheskii sbornik)* [Water Resources and Water Management of Russia in 2009 (Data Book)]. Rybal'skii N.G., Dumnov A.D., Eds. Moscow: NIA-Priroda Publ., 2010. 372 p.
- Vodnye resursy i vodnoe khozyaistvo Rossii v 2018 godu (Statisticheskii sbornik)* [Water Resources and Water Management of Russia in 2018 (Data Book)]. Rybal'skii N.G., Omel'yanenko V.A., Eds. Moscow: NIA-Priroda Publ., 2019. 274 p.
- Vody Rossii (sostoyanie, ispol'zovanie, okhrana). 1986–1990 gg.* [Waters of Russia (State, Use, Protection). 1986–1990]. Sverdlovsk: UralNIIVH Publ., 1991. 148 p.
- Vozrozhdenie Volgi – shag k spaseniyu Rossii* [The Revival of the Volga Is a Step Towards the Salvation of Russia]. Komarov I.K., Ed. Moscow; N. Novgorod: Ekologiya Publ., 1996. 464 p.

ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НИЖНЕЙ ВОЛГИ: ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ И КОМПЕНСИРУЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

© 2023 г. М. В. Болгов^а, *, А. И. Беляев^а

^аФИЦ Агроэкологии РАН, Волгоград, Россия

*e-mail: bolgovmv@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.

После доработки 12.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

В статье представлен обзор основных гидрологических и водохозяйственных задач и проблем, возникших в последние десятилетия на Нижней Волге в результате строительства и эксплуатации Волжско-Камского каскада водохранилищ, антропогенных изменений стока, плохо предсказуемых климатических изменений. Изменения стока привели к трансформации водной среды и всей экосистемы реки в целом. Несмотря на ряд компенсационных мероприятий, водные проблемы пока далеки от решения. Все это делает весьма актуальным их исследование. Среди таких проблем – повышение оправдываемости прогнозов притока к водохранилищам, долгосрочное прогнозирование многолетних колебаний стока в условиях происходящих изменений климата, оценка деформации русел в условиях антропогенного воздействия. Последнее особенно важно для нижнего бьефа Волгоградской ГЭС. При прогнозировании поведения экосистем Нижней Волги, с оценкой их устойчивости, требуется дальнейшее развитие методов расчета допустимых воздействий, совершенствование систем мониторинга. Сегодня управление Волжско-Камским каскадом водохранилищ осуществляется на основе диспетчерских правил, насчитывающих не один десяток лет. Показано, что современное управление должно основываться на согласованной системе приоритетов, включающей в себя и экологические критерии. Особенно острые экологические и водохозяйственные проблемы возникли в северной части Волго-Ахтубинской поймы, а также в зоне Западно-подstepных ильменей. Рассмотрены новые методы изучения экологических систем, находящихся здесь в условиях сильного антропогенного стресса, и соответствующие инженерные подходы, позволяющие комплексно подойти к достижению устойчивого управления водными ресурсами. Затрагивается проблема слабо предсказуемых колебаний уровня Каспийского моря, а также проблема управления водными ресурсами региона в условиях противоречивых интересов пользователей. Обсуждаются основные мероприятия, реализация которых позволит смягчить последствия регулирования стока для экосистемы Нижней Волги. Из важных системных принципов отмечена необходимость бассейнового подхода, предполагающего, как минимум, разработку Генеральной схемы использования водных ресурсов Волги.

Ключевые слова: Нижняя Волга, Волго-Ахтубинская пойма, каскад водохранилищ, Западно-подstepные ильмени, гидрологический режим, изменения в результате регулирования стока, водные проблемы

DOI: 10.31857/S2587556623060031, **EDN:** EZEJWU

ВВЕДЕНИЕ

Нижняя Волга – уникальный по географическим особенностям и природным ресурсам регион Российской Федерации, на территории которого сталкиваются интересы различных отраслей экономики, использующих ресурсы реки Волги и Каспийского моря. Развитие экономики предполагает эффективное использование водных и водно-биологических ресурсов, на которые, в свою очередь, существенное воздействие оказывает Волжско-Камский каскад водохранилищ (ВКК). Интересы различных отраслей экономики при использовании водных ресурсов зачастую

противоречивы, поэтому оптимальное решение в области распределения стока между потребителями найти сложно. При этом очевидно, что практически любое антропогенное воздействие оказывает негативное влияние на природную среду.

По отношению к водным ресурсам изучаемый географический регион образует сложную систему, гидрологическая и водохозяйственная специфика которой заключается в том, что единственным источником воды является р. Волга, так как ниже Волгограда, в условиях аридного климата, имеет место только рассеивание стока. Местный сток чрезвычайно мал и определяется, в основ-

ном, запасами влаги в формирующемся снежном покрове. К этому еще можно добавить наблюдаемые в результате глобального потепления изменения речного стока, усложняющие его регулирование, а также слабо прогнозируемые колебания уровня Каспийского моря, определяющие гидрологический режим водотоков в нижней части дельты.

Отрасли экономики в регионе преимущественно ориентируются только на использование волжского стока, поскольку его ресурсы, в количественном выражении, намного превышают местное водопотребление. Основная проблема (или сложность) заключается в том, что в результате строительства и эксплуатации ВКК естественный режим стока р. Волги был кардинально нарушен, и его современное распределение внутри года не отвечает интересам ряда отраслей хозяйства и потребностям экосистем (в первую очередь условиям естественного воспроизводства водных биоресурсов).

Очевидно, что для решения комплекса обсуждаемых проблем должен быть реализован системный подход, заключающийся, с одной стороны, в анализе “индивидуальных” проблем и задач и выяснении их противоречивого характера, а с другой — в попытке найти компромиссное решение, по возможности удовлетворяющее интересы всех участников процесса использования водных и биоресурсов в регионе. Эта задача уже не является инженерно-гидрологической (или инженерно-экологической) и может рассматриваться в рамках разработки документов стратегического планирования региона. Подходы к ее решению определяются как сложившейся в условиях ведения хозяйства практикой водodelения (водопользования) в регионе, так и состоянием организационно-управляющей структуры в регионе, характеризующейся в числе прочего и наличием (или отсутствием) политической воли, необходимой для реформирования сложившихся подходов на основе достижения целей перспективного планирования социально-экономического развития региона (Belyaev et al., 2022).

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

В водохозяйственном плане регион Нижней Волги представляет собой часть бассейна Волги от Волгоградского гидроузла до Каспийского моря, включая Астраханскую область, часть Волгоградской области и Калмыкии (население 2.43 млн чел., 7 городов, 13 поселков, 694 прочих населенных пункта). Кроме рыбного хозяйства, водные ресурсы используются для орошения и обводнения, питьевого и промышленного водоснабжения, поддержания условий судоходства. Нижняя Волга имеет важное транспортное значение, в регионе развит речной и морской транспорт, работа

которого во многом зависит от водности Волги, распределения ее стока по дельтовым водотокам, а также от уровня Каспийского моря. Стратегическое значение приобретает международный транспортный коридор “Север—Юг”, в значительной мере использующий водные объекты региона.

В населенных пунктах Нижней Волги расположены многочисленные промышленные предприятия, сбрасывающие в водные объекты сточные воды различной степени очистки, усугубляя их экологическое состояние, учитывая, что основной объем загрязнений поступает в Нижнюю Волгу из вышележащих участков Волжского бассейна.

Водохранилища Волжско-Камского каскада, изменив естественные гидрологические условия, обеспечивают решение водохозяйственных задач Поволжья и Центральной России в целом, но при этом на Нижней Волге образовался ряд новых проблем: нарушение характера внутригодового распределения стока, и, как следствие, сокращение площадей и продолжительности затопления пойменных (нерестовых) массивов, деградация пойменных водоемов, перекрытие путей миграции на нерест ценных видов проходных и полупроходных рыб, усилившееся антропогенное воздействие на экосистему в целом. Регулирование стока каскадом водохранилищ для безопасного пропуска высоких вод весной и обеспечения водой Нижней Волги в межень осложнено неконтролируемой застройкой нижних бьефов гидроузлов, изменением условий эксплуатации водозаборов и другими новыми требованиями, возникающими в современных условиях (Александровский и др., 2016).

Водохозяйственные проблемы Нижней Волги до настоящего времени почти не исследовались в их комплексном рассмотрении. Попытки решить задачу оптимизации водохозяйственного комплекса Нижней Волги глобально на основе экономических критериев согласования принимаемых решений оказались нереализуемыми, поскольку стоимостные показатели отдельных видов производств (отраслей экономики) несравнимы между собой (Елаховский, 1979). С одной стороны, ресурсы поверхностных вод характеризуются в общем как достаточные, по крайней мере по объему, а с другой — намерение изменить сложившиеся режимы в пользу какого-то другого участника водохозяйственного комплекса представляет собой заведомо неэффективную попытку с точки зрения использования имеющихся ограниченных ресурсов и возможностей регулирования. Тем не менее далеко не самые эффективные подходы до сих пор реализуются на практике, как, например, обводнение зоны Западно-подступных ильменей (далее ЗПИ) за счет принудительной закачки воды по системе трактов, хотя еще в 1970-е годы было показано, что в силу зна-

чительных потерь экономическая эффективность такой схемы обводнения составляет 5–15%.

Проблемы ЗПИ и других водных систем будут рассмотрены ниже, здесь же необходимо сказать, что оптимизационными методами можно добиться согласования принимаемых управленческих решений применительно к неэкономическим критериям и на основе назначаемой системы предпочтений и приоритетов. Имеющиеся водные ресурсы увеличить нельзя (без переброски стока северных рек), так как они определяются климатом бассейна Волги, и в условиях не очень большой емкости водохранилищ каскада (по сравнению с годовым стоком) водохозяйственные проблемы могут быть решены только путем реализации комплекса специальных мероприятий, имеющих локальный характер, и направленных на решение конкретных экономических (хозяйственных) или экологических задач. Среди таких проектов можно отметить дополнительную подачу воды в исток Ахтубы вместе с комплексом работ по мелиорации водных объектов Волго-Ахтубинской поймы (ВАП), ввод в эксплуатацию Астраханского вододелителя в комплексе с мелиорацией нерестилищ и восстановлением каналов-рыбоходов, переустройство системы обводнения ЗПИ с целью обеспечения приемлемого экологического состояния водных объектов, переустройство водозаборов мелиоративных систем сельскохозяйственного назначения для обеспечения их проектной надежности.

Под воздействием хозяйственной (водохозяйственной) деятельности существенные негативные изменения претерпевают практически все водные экосистемы региона, и возникает проблема нормирования (определения допустимых нагрузок). Десятилетия эксплуатации водных ресурсов Волги привели к новому состоянию всех компонент среды, и разрабатываемые рекомендации должны исходить как из понимания невозможности возврата к прошлому состоянию, так и, несомненно, не допускать дальнейшей деградации природной среды. Результаты мониторинговых исследований показывают, что экосистема региона (ВАП) пребывает в некотором новом устойчивом состоянии, характеризующимся в целом пониженным уровнем биопродуктивности, новым состоянием сообществ, наличием инвазивных видов и прочими в целом деградированными компонентами водной среды (Кузьмина, Трешкин, 2017).

Дальнейшее развитие водохозяйственного комплекса Нижней Волги должно исходить из понимания факта нового устойчивого состояния, сформировавшегося под преимущественным влиянием техногенного фактора, и рекомендуемые мероприятия должны определяться (и проектироваться) исходя из новых “рамочных” условий. Уже

упоминавшаяся зона ЗПИ может рассматриваться сегодня как совокупность водных объектов в тех новых границах, какие могут быть обводнены в условиях зарегулированного стока. В силу тех же обстоятельств ВАП не может более рассматриваться в тех же границах, которые соответствовали ее обводнению до создания ВКК.

Сказанное необходимо дополнить возникновением новых рыночных механизмов, определяющих инвестиции в отдельные отрасли экономики региона, осуществляющие использование водных ресурсов, и формирующих “текущие” ограничения на использование водных ресурсов.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

Гидрография Нижней Волги

Современное гидрографическое строение бассейна Нижней Волги имеет ряд особенностей. Непосредственно ниже Волгоградского гидроузла берет начало современная Ахтуба — левый рукав Волги. При строительстве ГЭС р. Ахтуба оказалась перегороженной глухой земляной плотинной и для ее обводнения водой из Волги в 6 км ниже створа сооружений гидроузла прорыт канал протяженностью 6,7 км, получивший название Волго-Ахтубинский. На 47 км ниже гидроузла расположено начало Волго-Донского судоходного канала. На расстоянии 140 км Ахтуба вплотную сближается с Волгой, а на расстоянии 460 км от Волгоградского гидроузла влево отходит первый большой рукав дельты — Бузан.

Дельта Волги занимает площадь 19 тыс. км², расстояние между крайними западным и восточным рукавами составляет 170 км. Дельта Волги делится на три основные зоны: верхнюю и среднюю (482 водотока), и нижнюю зону с интенсивными (около 800) разветвлениями русел (Устьева ..., 1998). На 462 км выше г. Нариманов и на 22 км ниже истока р. Бузан построен Астраханский вододелитель, перегораживающий Волгу и создающий подпор таким образом, что при его работе часть стока направляется в рукав Бузан, увеличивая продолжительность затопления Восточной части дельты. Продолжением рукава Бахтемир является Волго-Каспийский канал, обеспечивающий соединение речной и морской частей транспортного коридора, эксплуатация которого сопровождается большими объемами дноуглубительных работ.

Климатические изменения в стоке р. Волги

Многолетние колебания речного стока в бассейне Волги являются предметом многочисленных исследований, результаты которых отражены и в настоящем выпуске журнала. Актуальной за-

дачей является анализ и прогноз происходящего в последние десятилетия в результате климатических изменений перераспределения стока Волги внутри года при сохранении в целом характера его многолетних колебаний (стационарности). Для выяснения характера изменений стока существующие ряды средних многолетних расходов бокового притока к основным гидроузлам Волжско-Камского каскада были разделены на две части: с начала наблюдений в 1914 и до 1969 г. включительно, а также с 1970 г. по настоящее время. Для каждого периода методом компоновки сезонов Андреянова-Лифшица было получено расчетное внутригодовое распределение стока для пяти градаций водности года: особо многоводный, многоводный, средней водности, маловодный, особо маловодный.

Полученные результаты выявили существенные изменения внутригодового распределения стока, особенно в маловодные периоды. Наиболее чувствительной характеристикой оказался сток зимней межени во все годы (многоводные и маловодные). Сток половодья в маловодные годы изменился не столь существенно, в основном в пределах 10–15%. Для многоводных лет характерно уменьшение стока в период половодья на большинстве водохозяйственных участков.

В целом, по результатам статистических расчетов, можно сделать следующий вывод: в результате климатических изменений в бассейне Волги произошло перераспределение стока внутри года, выражающееся в уменьшении стока половодных периодов, и в заметном увеличении стока маловодных периодов (летне-осенней и зимней межени) во всех градациях водности. Выявленные особенности сказываются и на характере регулирования стока: в последние десятилетия заметно сократился объем предполоводной сработки основных регуляторов ВКК, что говорит о необходимости корректировки Правил использования водных ресурсов волжских водохранилищ. Детальные современные оценки климатически обусловленных изменений притока к водохранилищам ВКК приведены в (Многолетние ..., 2017), а также обсуждаются в ряде других работ (Болгов и др., 2014, 2016).

Проблема колебаний уровня Каспийского моря

Гидрологический режим большей части водотоков дельты Волги находится под влиянием колебаний уровня Каспийского моря, основную роль в формировании которых играют приток и испарение с водной поверхности моря (Крицкий, Менкель, 1964; Крицкий и др., 1975). При стационарном в целом характере временной изменчивости этих процессов в гидрологическом режиме моря и р. Волги тем не менее имеется несколько особенностей. В тридцатые годы прошлого столе-

тия во временном ряду годового стока Волги выделяется период экстремального маловодья, вероятность которого в Марковском стационарном приближении оценивается как 1 раз в 900–1000 лет. Этот маловодный период непосредственно сказывается на связанных со стоком Волги колебаниях уровня Каспийского моря — отмечается падение уровня моря в этот же период, вероятность которого, по оценкам В.Е. Привальского (1985), составляет примерно 1 раз в 2000 лет. Продолжившееся затем в течение нескольких десятилетий снижение уровня моря закончилось в 1979 г. и сменилось резким подъемом уровня на 2.5 м за последующие 15 лет. Этому же году соответствует и смена на большинстве рек в бассейне Волги маловодного периода на многоводный, продолжившийся до конца 1990-х годов. Начиная с 1995 г. уровень моря в основном падает, причем различными темпами.

Долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря может быть получен как решение уравнения его водного баланса в виде динамико-стохастической модели, в основу которой положены стохастические модели многолетней изменчивости компонентов уравнения водного баланса — притока и видимого испарения с учетом амортизационного механизма колебаний уровня моря (Привальский, 1985).

Стохастическое дифференциальное уравнение водного баланса решается методом имитационного моделирования. Такой подход позволяет решить вероятностную задачу без ограничений на вид маргинальных распределений, морфометрических зависимостей и прочих нелинейных связей (Раткович, Болгов, 1994). Продолжительные ряды уровней моря получаются путем многократного решения уравнения водного баланса на год вперед с учетом оттока в залив Кара-Богаз-Гол. Вероятностный прогноз уровня Каспия можно представить как в виде параметров условного распределения (условные среднее, дисперсия, асимметрия и пр.), так и в виде набора квантилей условных распределений вероятности. Прогноз уровня моря зависит от начальных условий (уровень в году выпуска прогноза), но с заблаговременностью до 40 лет можно сказать, что наиболее неблагоприятный прогноз (уровень 0.1% обеспеченности) составляет –25.8 м, а наиболее низкий уровень (99% обеспеченности) составляет –30.7 м. Подробное изложение современного состояния проблемы прогнозирования Каспия, а также другие подходы к анализу его колебаний, можно найти в (Болгов и др., 2018б; Водный ..., 2016) и других изданиях.

*Гидравлические особенности
Волго-Ахтубинской поймы*

Большое количество прикладных гидрологических задач требует знания гидравлических характеристик водотоков. Гидравлика системы водотоков Нижней Волги сложна и эффективно исследуется средствами математического моделирования. Расчет неустановившихся течений в сложных русловых системах с поймой в большинстве случаев можно осуществлять с помощью одномерных гидравлических моделей на основе системы уравнений Сен-Венана, хотя известны и более простые подходы, основанные на классических методах прогноза трансформации паводочных волн. Модель движения речного потока на участке бассейна Нижней Волги от Волгоградской ГЭС до Каспийского моря разработана на основе программного продукта “SOBEK” Дельфтской гидравлической лаборатории (Отчет ..., 2016).

Структура модели представляет собой последовательную совокупность всех расчетных точек и участков русел по рукавам и протокам Волги, ее дельты, Ахтубы и Волго-Ахтубинской поймы от нижнего бьефа Волгоградского водохранилища до морского края дельты. Для учета пойменного регулирования в структуре модели создается дополнительная сеть имитационных каналов и емкостей, которые компенсируют влияние выхода русловых потоков на пойму и изменение водного баланса на промежуточных створах. В структуру модели для расчетов включены все основные рукава и протоки дельты и Волго-Ахтубинской поймы, ширина которых в период межи превышала 20–25 м. Входные граничные узлы гидродинамической модели Нижней Волги расположены в Нижнем бьефе Волгоградской ГЭС, шлюзовом канале и старом русле реки Ахтубы. Выходные граничные узлы расположены в низовьях дельты практически на взморье Каспийского моря.

С помощью описанной выше гидродинамической модели исследовались гидравлические режимы рек и водотоков Волго-Ахтубинской поймы, режимы работы астраханского водodelителя, оценивались последствия регулирования стока для системы ЗПИ. Модель показала хорошую применимость на различных масштабах воспроизведения (от отдельных озер и ериков, до всей системы Нижней Волги в целом). Дальнейшее развитие модели связано с организацией сети специальных мониторинговых наблюдений, позволяющей отслеживать происходящие изменения водотоков и осуществлять калибровку параметров.

Водохозяйственные проблемы нижней Волги

Современный гидрологический режим Нижней Волги определяется условиями регулирова-

ния стока на всем Волжско-Камском каскаде, но роль основного регулятора в системе играет Куйбышевское водохранилище. Основные изменения, произошедшие в режиме стока Волги в результате работы ВКК, а частично вследствие изменения климатических условий, сводятся к следующему (Отчет ..., 2016):

- возникновение не характерных для естественного режима периодов колебания стока и уровня воды — суточных и недельных;

- значительное сокращение объема стока весеннего половодья и увеличение водности межени, особенно зимней;

- сокращение продолжительности половодий и сокращение фазы подъема половодья в силу особенностей принятых методов регулирования стока;

- изменение температурного режима и, как следствие, нарушение ледового режима;

- изменение гидролого-морфологического режима водотоков.

Экологически эффективное использование стока в бассейне Нижней Волги заключается в весеннем затоплении пойм в оптимальные сроки, необходимом для обводнения сельскохозяйственных площадей и наполнения ильменей, в поддержании стабильных уровней воды в период нереста и для возможности схода молоди рыбы в основные русла с их многочисленными протоками, а также для обеспечения судоходства, водоснабжения и функционирования водозаборов. Рассмотрим далее основные проблемы, возникающие при управлении водными ресурсами.

*Проблемы регулирования уровня воды
на Волго-Ахтубинской пойме и дельте Волги*

Если до зарегулирования Волги пойменные земли затоплялись почти ежегодно, то в последние десятилетия частота затопления ВАП сократилась в среднем в два раза, а необходимые для рыбного и сельского хозяйства продолжительность и глубина затопления обеспечиваются только в 35% лет. Особенно неблагоприятные условия для естественного воспроизводства биоресурсов складываются в маловодные годы, когда объемы рыбохозяйственных попусков резко снижаются. Назначение графика весенних попусков в нижнем течении Волги является сложнейшей водохозяйственной задачей, зависящей от особенностей развития половодья в бассейнах Волги и Камы, общей водохозяйственной обстановки, температуры воды и воздуха, хода нереста рыб в низовьях Волги, заявок на воду сельского хозяйства и других отраслей (Беднарук, Мотовилов, 2017). Тем не менее во многие годы искусственные попуски по срокам и темпам их нарастания и падения, продолжительности пиков и величине

расходов воды не обеспечивают требований рыбного хозяйства.

В практике управления ВКК предусматривалась организация целевых весенних пусков в нижний бьеф Волгоградского гидроузла с учетом работы Нижневолжского вододелителя, который был сдан в эксплуатацию в 1976 г. Назначение вододелителя — создание в вершине дельты Волги временного подпора с тем, чтобы при весенних паводковых расходах от 12 до 25 тыс. м³/с обеспечить подачу воды в р. Бузан расходом 8–9 тыс. м³/с для оптимального затопления рыбных нерестилищ восточной дельты (Отчет ..., 2016). В 1981 г. были утверждены правила эксплуатации вододелителя, однако он ни разу не работал в проектом режиме. В современных условиях вододелитель практически не используется, поскольку изменение режима затопления восточной части дельты может нанести ущерб сельскому хозяйству западной части дельты и ЗПИ. По мнению ихтиологов, при проектировании и строительстве вододелителя недостаточно были учтены все особенности существования и воспроизводства наиболее ценных осетровых рыб Волго-Каспийского бассейна.

Для сельского хозяйства и влагозарядки поймы в современных условиях предпочтительным является компактный остропиковый гидрограф расходов воды через Волгоградский гидроузел, а для рыбного хозяйства, наоборот, необходимо обеспечение плавного подъема уровней воды с середины апреля до конца мая — начала июня, затем плавного спада и стояния воды на полях не менее 45–50 сут. Несмотря на то, что в период пусков обеспечиваются уровни, необходимые для затопления нерестилищ, длительность стояния этих максимальных уровней значительно меньше, чем в естественных условиях, и составляет не более 4–8 дней. Для рыбного хозяйства оптимален объем весеннего пуска до 120 км³ в средние по водности и до 90 км³ в маловодные годы (Катунин, 2014; Отчет ..., 2016). Очевидно, что регулирование стока по графику, благоприятному для естественного воспроизводства биоресурсов, приведет к уменьшению объема аккумулируемого в водохранилищах весеннего стока, который предназначен для обеспечения транспортных пусков летом и на выработку электроэнергии зимой, и, соответственно, к снижению степени гарантии соответствующих отдач.

Для обеспечения обводнения ВАП, как отмечалось выше, построен Волго-Ахтубинский канал. Он должен был обеспечить р. Ахтубу волжской водой в количестве, необходимом для поддержания существующих и перспективных систем водоснабжения и орошения, включая разные варианты устройства лиманного орошения. В настоящее время при пуске в нижний бьеф ГЭС 4000 м³/с расход Ахтубы в устье составляет менее 50 м³/с, а

при меньшей водности Волги расход воды в Ахтубе может падать до нуля. В нижнем бьефе Волгоградского гидроузла существует проблема размыва основного русла р. Волги, в результате которого произошло понижение (посадка) уровня воды до 1.5 м, а деформация Волго-Ахтубинского канала, в том числе в результате саморазмыва, привела к изменению гидравлического режима водообмена между Волгой и Ахтубой. Для поступления достаточных объемов воды в р. Ахтубу в современных условиях требуются сбросные расходы воды 28000–29000 м³/с, что возможно далеко не каждый год и только в период половодья. Современные исследования показывают, что эта ситуация не стабилизируется.

Водохозяйственные проблемы ЗПИ

Наиболее сложная водная проблема сложилась в системе ЗПИ. Система ильменей примыкает с запада к дельте Волги. Их общая площадь около 892 тыс. га, в том числе в Астраханской области — 550 тыс. га, в Республике Калмыкия — 342 тыс. га. Территория представляет собой равнину, рельеф которой характеризуется наличием своеобразных форм — бугров Бэра с межбугровыми понижениями, занимаемыми ильменями. До зарегулирования стока Волги ильмени имели хорошую гидравлическую связь с западными рукавами дельты. Вода из Волги во время половодий проникала в западном направлении на 50–70 км. На спаде половодья направление течения в системе ильменей изменялось, и вода возвращалась в Волгу. В целом в системе озер поддерживался уклон водной поверхности в направлении с севера на юг, в результате чего наблюдался промывной режим и поддерживалось благополучие экосистемы.

Произошедшие изменения условий обводнения ЗПИ связано в основном с последствиями регулирования стока Волги, которое привело к срезке пиков половодий и уменьшению их длительности и, соответственно, к резкому преобразованию гидрологического режима ильменей. На гидрологический режим ильменей оказывает влияние также комплекс мелиоративных мероприятий по регулированию обводнения территории: постройка дамб, перемычек, насыпей, дорог, перегораживающих водотоки; прокладка искусственных водных трактов с принудительной подачей воды в ильмени; широкое применение орошения и осушения крупных ильменей.

Изменение водно-солевого режима ильменей ведет к изменению видового состава растительности. В результате площадь ильменей сокращается, а на местах бывших ильменей образуются солончаки, исчезает растительность и животный мир, изменяется микроклимат и рельеф местности. Вопрос сохранения ильменного ланд-

шафта решался путем создания сетей государственных оросительных систем, которые по естественным и искусственным каналам подают волжскую воду не только в ильмени, но и на орошение сельскохозяйственных угодий, а также на обводнение и водоснабжение многочисленных населенных пунктов, расположенных на территориях Наримановского, Икрянинского и Лиманского районов Астраханской области. Основная проблема состоит в том, что финансирование управлений оросительных систем недостаточное, гидротехнические сооружения находятся в изношенном состоянии, водоподающие каналы и протоки заиливаются, что в целом негативно сказывается на экологической обстановке. В последние десятилетия ЗПИ обводняются только в многоводные годы и лишь в пределах узкой прибахтемирской полосы.

Существует ряд предложений по улучшению водохозяйственной обстановки в районе ЗПИ. В проектных разработках, выполненных Ленгипроводхозом, рекомендуется выполнить работы по мелиоративному и сельскохозяйственному обустройству прибахтемирской полосы шириной 5–15 км и юго-восточной части территории в районе райцентра Лиман с целью интенсификации сельскохозяйственного производства (в основном бахчевые) в этой ограниченной зоне. КаспНИРХ рекомендует вселение белого амура в оросительно-обводнительные тракты на ЗПИ с целью биологической мелиорации. Годовой прирост амура в этих условиях позволяет добывать в каналах 480 т рыбы. Однако биологическая мелиорация водоподающих трактов, конечно, не может являться решением всех проблем.

В настоящее время ЗПИ эксплуатируются по экстенсивному типу с полным пренебрежением к требованию экономии водных ресурсов. Положение в этом регионе может быть улучшено только путем радикальных преобразований методов и форм хозяйствования. Перспективным представляется рыбохозяйственный вариант использования ЗПИ в той их части, которая наиболее пригодна для этого по ряду морфометрических, гидрогеологических и других показателей.

Проблемы заиливания рыбоходных каналов

В условиях низкого стояния уровня Каспийского моря, начиная с конца 1950-х годов прошлого века, отмелая зона устьевого взморья Волги начала интенсивно зарастать, что стало препятствием для прохождения на нерест и обратно осетровых рыб. Причиной послужил низкий уровень моря и, как следствие, малые глубины и распресненная вода в мелководной зоне. Для улучшения условий нереста и нагула молоди в отмелой зоне в 1960-х годах были построены основные рыбоходные каналы общей протяженностью око-

ло 900 км. В настоящее время в отмелой зоне существует 2 судоходных канала, 8 магистральных каналов-рыбоходов и 16 вспомогательных каналов-рыбоходов, не имеющих выхода на приглубое взморье (Отчет ..., 2016). Каналы дополнялись прокосами, которые представляют собой расчищенные от высшей водной растительности полосы шириной 10–60 м вдоль и поперек отмелой зоны.

Трассировка некоторых каналов выполнялась без учета преобладающих направлений струйных стоковых течений, что явилось одной из причин их интенсивного заиливания. Само строительство каналов также способствовало зарастанию отмелой зоны, так как отвалы грунта на бровках каналов служили очагами распространения высшей водной растительности (Болгов и др., 2007).

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБВОДНЕНИЕ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ ИЗ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Существующее неблагоприятное состояние Волго-Ахтубинской поймы связано с недостаточной водностью р. Ахтубы, сложившейся в результате строительства Волгоградского гидроузла. В верхней части поймы уровень воды Ахтубы расположен выше среднего уровня воды Волги, поэтому верхняя часть Волго-Ахтубинской поймы заполняется во время половодья водой, в первую очередь, из Ахтубы. Необходимо увеличить количество поступающей в Ахтубу воды как в половодье, так и в межень и обеспечить подачу воды из Ахтубы в основные водные объекты верхней части поймы.

Увеличение водности Ахтубы возможно путем направления в ее исток воды непосредственно из Волгоградского водохранилища или из Волги ниже гидроузла с помощью насосных установок. Обводнение ВАП предлагается осуществлять в два этапа. Первый этап – самотечное поступление воды из Волги в Ахтубу в половодье на подъеме и пике сбросного гидрографа за счет превышения уровней воды в Волге по существующему Волго-Ахтубинскому каналу. Расходы в верховье Ахтубы в этот период достигают 1500–2500 м³/с. Второй этап начинается после снижения сбросного расхода воды в нижнем бьефе Волжской ГЭС до 10–12 тыс. м³/с, когда прекращается поступление воды из Волги в Ахтубу и включается система водоподдачи в исток Ахтубы непосредственно из водохранилища в течение летней межени с расходами, обеспечивающими поддержание экологически требуемого водного режима в водных объектах на территории ВАП.

Принципиальная схема дополнительной водоподдачи в систему водных объектов Волго-Ахтубинской поймы представлена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема дополнительной водоподачи в систему водных объектов Волго-Ахтубинской поймы (синие стрелки — направление потока в период весеннего половодья, красные стрелки — направление подачи воды в период летней межени за счет механической подачи).

Источник: (Отчет ..., 2016).

При обводнении в Ахтубе установится уровень воды выше, чем в Волге, и вода обратным током будет поступать из Ахтубы в Волгу через Волго-Ахтубинский канал (см. рис. 1). Потребуется выполнить мероприятия, препятствующие перетоку воды из Ахтубы в Волгу. Таким мероприятием может служить регулирующее сооружение, представляющее собой низкую переливную плотину, частично сужающую живое сечение истока Ахтубы на участке присоединения к Волге.

В зависимости от подаваемого объема воды будет достигаться различный режим обводнения на различных по площади участках поймы. Для пропуска воды из Волгоградского водохранилища в Ахтубу планируется водопропускное сооружение, которое располагается на левом берегу водохранилища за пределами сооружений напорного фронта гидроузла. Предусмотрено устройство

гидроэлектростанции на тракте водоподачи из водохранилища в исток Ахтубы, что позволит компенсировать энергозатраты при работе намечаемых насосных станций в нижнем бьефе, подающих воду из Ахтубы в водные объекты поймы.

Проектируемая ГЭС позволит вырабатывать в год ориентировочно 130 млн кВт/ч электроэнергии, из которых 30 млн кВт/ч будет израсходовано на работу насосных станций первого подъема. Рекомендуются вариант с объемом водоподачи 100 м³/с, обеспечивающий необходимое обводнение водотоков и водоемов верхней части Волго-Ахтубинской поймы, который обоснован расчетами гидродинамической модели затопления Волго-Ахтубинской поймы.

Регулирующее сооружение в Волго-Ахтубинском канале (современном истоке Ахтубы) обес-

печивает независимый от уровня воды в Волге гидравлический режим в Ахтубе при низких уровнях воды в Волге и представляет собой низконапорную переливную плотину, сужающую живое сечение русла Ахтубы в сочетании с обводным каналом для улучшения условий маломерного судоходства. Плотина и обводной канал располагаются в створе острова, делящего русло на две протоки.

В основную схему водоподачи, кроме подводящего канала, системы водоводов, шлюза и ГЭС, входят головные насосные станции (ГНС), подающие воду непосредственно из Ахтубы в систему ериков и озер северной части Волго-Ахтубинской поймы. Расположение головных насосных станций и водные объекты (водотоки и водоемы) Волго-Ахтубинской поймы определяется положением основных трактов водоподачи на пойме.

Необходимо отметить, что в настоящее время силами проектных организаций разрабатывается проект обводнения Ахтубы в другой компоновке, предусматривающей создание регулирующих сооружений в самой Ахтубе и существенно больший объем водозабора из Волгоградского водохранилища преимущественно на нужды орошения в регионе.

СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА

Один из основных методов улучшения экологического состояния Нижней Волги — это изменение правил управления ВКК для достижения более высокой степени гарантии характеристик стока, определяющих естественные условия воспроизводства биоресурсов.

Для формирования попусков в системе гидроузлов ВКК в оперативном режиме разработана математическая модель, алгоритм и вычислительная технология (ВТ) функционирования водохранилищ, реализующая оптимизационный подход при решении задачи оперативного управления гидроузлами в период весеннего половодья (Болгов и др., 2017, 2018а, 2019). Методика основана на использовании методов многокритериального анализа (теории компромиссов) и позволяет осуществлять поиск компромиссных решений в интересах различных водопользователей (водоснабжение, гидроэнергетика, транспорт, экология, сельское и рыбное хозяйство и др.). Предлагаемая технология реализована для девяти крупных водохранилищ ВКК: Рыбинского, Нижегородского, Чебоксарского, Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского на Волге и Камского, Воткинского и Нижнекамского на Каме, суммарный полезный объем которых составляет 78 км³.

Основным критерием управления водными ресурсами является конфигурация спецпуска,

описывающая характер затопления сельскохозяйственных угодий и нерестилищ Нижней Волги. В спецпуске задаются следующие фазы: “подъем” — нарастание расхода, “сельскохозяйственный попуск” — фаза пропуска постоянного максимального расхода для затопления пойменных лугов (24500–27000 м³/с, продолжительностью 5–10 дней), “рыбохозяйственный попуск” — фаза пропуска постоянного максимального расхода для поддержания оптимальных режимов нереста (14000–20000 м³/с, продолжительностью 14–23 дня), “спад” — фаза убывания расходов, “транспортный попуск” — фаза навигации (не менее 5000 м³/с).

На основе решения ряда оптимизационных задач формируется множество недоминируемых решений, из которых методом достижимых целей и соответствующим аппаратом визуализации, может быть выбрано “оптимальное” в смысле Парето решение (Лотов, 2002). Окончательное на текущую дату решение принимается в процессе обсуждения всего множества полученных недоминируемых решений на заседании Межведомственной рабочей группы МРГ, органа, ответственного за принятие решений по регулированию режимов работы водохранилищ ВКК. Инструментарием для визуализации результатов и быстрого принятия компромиссного решения служит программа Pareto Front Viewer, разработанная в вычислительном центре им. А.А. Дородницына РАН (Лотов, 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценивая современное состояние водообеспечения и в целом проблем в области управления водными ресурсами на Нижней Волге, можно сказать следующее:

1. Гидрологический режим в низовьях Волги претерпел существенные изменения как в результате регулирования стока водохранилищами, так и по причине климатических изменений. Произшедшие изменения стока привели к существенным изменениям природной, в частности водной, среды. Эти негативные эффекты частично прогнозировались при проектировании каскада, и потому был запланирован и реализован набор компенсационных мероприятий. Тем не менее возник ряд новых экологических, технических и научных проблем, требующих для своего решения комплексного подхода, а эффективность запланированных мероприятий оказалось недостаточной.

2. Блок научных проблем предполагает дальнейшее развитие методов решения инженерно-гидрологических задач таких, как повышение оправдываемости прогнозов притока к водохранилищам, долгосрочное прогнозирование многолетних колебаний стока в условиях происходя-

щих изменений климата, получение актуальных оценок негативных процессов — деформации русел, переработки берегов. В части прогнозирования поведения экосистем Нижней Волги с оценкой их устойчивости требуется развитие методов оценки допустимых воздействий, развитие систем мониторинга их состояния.

3. Управление Волжско-Камским каскадом водохранилищ должно основываться на согласованной системе приоритетов, включающей в себя и экологические критерии. Полноценная оптимизационная постановка задачи поиска оптимального управления каскадом сегодня вряд ли возможна по причине сложности получения сравнимых оценок ущербов и выгод для всех участников водохозяйственного комплекса, но подходы, основанные на поиске, например, компромиссного решения на уровне договоренности сторон, вполне реализуемы.

4. Наиболее сложные водохозяйственные задачи возникли в северной части Волго-Ахтубинской поймы, а также в зоне ЗПИ. Для решения этих задач необходимы новые методы изучения экологически неблагоприятных систем и соответствующие инженерные подходы, позволяющие комплексно подойти к достижению устойчивого управления водными ресурсами региона.

5. Для реализации поставленных задач необходим бассейновый подход, предполагающий, как минимум, разработку Генеральной схемы использования водных ресурсов р. Волги.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Представленные в статье результаты исследования и обобщения проблем Нижней Волги получены в последние годы при выполнении ряда научных тем в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН (тема FNFE — 2022-0011, государственная регистрация 122020100450-9).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность сотрудникам ФГБУ ГОИН к.ф.-м.н. Землянову И.В., с.н.с. Горелиц О.В., а также зав. отделом ФГБУН ВНИИГИМ Буберу А.Л. за предоставленные данные и полезные обсуждения.

FINANCING

The results of the study of the Lower Volga problems presented in the article have been obtained in recent years with the implementation of a number of scientific topics and grants. The work was carried out within the framework of the State Task of the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences (topic FNFE — 2022-0011, state registration 122020100450-9).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to the staff of the FSBI GOIN Ph.D. I.V. Zemlyanov, O.V. Gorelits, as well as the head of the department of the FSBI VNIIGIM A.L. Buber for the data provided and useful discussions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александровский А.Ю., Клименко В.В., Терешин А.Г. Особенности функционирования гидроэнергетики России в изменяющихся внешних условиях (на примере Волжско-Камского каскада ГЭС) / под общ. ред. А.Ю. Александровского и В.В. Клименко. М.: Энергия, 2016. 170 с.
- Беднарук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство. 2017. № 7. С. 22–35.
- Болгов М.В., Бубер А.Л., Комаровский А.А., Лотов А.В. Поиск компромиссных решений при планировании и управлении попусками в нижний бьеф Волгоградского гидроузла. Ч. 1. Стратегическое планирование // Водные ресурсы. 2018а. № 5. С. 573–580.
- Болгов М.В., Бубер А.Л., Комаровский А.А., Лотов А.В. Поиск компромиссных решений при планировании и управлении попусками в нижний бьеф Волгоградского гидроузла. Ч. 2. Тактическое планирование и оперативное управление // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 3. С. 333–344.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волги // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филиппова И.А. Речной сток и вероятностный прогноз уровня Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2018б. № 10. С. 17–26.
- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 72–81.
- Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А. Каспийское море. Экстремальные гидрологические события / отв. ред. М.Г. Хубларян. М.: Наука, 2007. 380 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
- Елаховский С.Б. Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. Вопросы оптимизации режимов. М.: Энергия, 1979. 192 с.
- Катунин Д.Н. Гидроэкологические основы формирования экосистемных процессов в Каспийском море и дельте реки Волги. Астрахань: ФГУП “КаспНИРХ”, 2014. 478 с.

- Крицкий С.Н., Коренистов Д.В., Раткович Д.Я. Колебания уровня Каспийского моря. М.: Наука, 1975. 159 с.
- Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Труды Гидропроекта. 1964. № 12. С. 29–61.
- Кузьмина Ж.В., Трешкин С.Е. Оценка изменений наземных экосистем Нижней Волги при зарегулировании // Аридные экосистемы. 2017. Т. 23. № 4 (73). С. 22–34.
- Лотов А.В. Компьютерная визуализация оболочки Эджворта-Парето и ее применение в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Информационные Технологии и Вычислительные Системы. 2002. № 1. С. 83–100.
- Многолетние характеристики притока в крупнейшие водохранилища РФ. Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. М.: ООО “РПЦ Офорт”, 2017. 132 с.
- Отчет о НИР “Научное обоснование мероприятий, обеспечивающих рациональное использование водных ресурсов и устойчивое функционирование водохозяйственного комплекса Нижней Волги, сохранение уникальной системы Волго-Ахтубинской поймы”, в рамках реализации федеральной целевой программы “Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах”, в 4 частях. Москва, ГОИН, Государственный контракт № 10-ГК/ФЦП-2013, 2013–2016 гг.
- Привальский В.Е. Климатическая изменчивость (стохастические модели, предсказуемость, спектры). М.: Наука, 1985. 183 с.
- Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 389–404.
- Устьевая область Волги: Гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря / отв. ред. В.Ф. Полонский, В.Н. Михайлов, С.В. Кирьянов. М.: ГЕОС, 1998 г.
- Belyaev A.I., Pugacheva A.M., Korneeva E.A. Assessment of ecosystem services of wetlands of the Volga-Akhtuba floodplain // Sustainability. 2022. Vol. 18. № 14. P. 11240.

Water Problems of the Lower Volga: Main Factors and Compensating Measures

M. V. Bolgov¹, * and A. I. Belyaev¹

¹Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

*e-mail: bolgovmv@mail.ru

The article presents an overview of the main hydrological and water management tasks and problems that have arisen in recent decades on the Lower Volga because of the construction and operation of the Volga-Kama cascade of reservoirs, anthropogenic changes in runoff as a result of economic activity, and the consequences of poorly predictable climatic changes. It is shown that the hydrological regime in the lower reaches of the Volga River has undergone significant changes, both as a result of regulation of runoff by reservoirs and due to climatic changes. The observed changes in flow fluctuations have led to serious changes in the aquatic environment and the entire ecosystem of the river. A number of negative consequences were predicted during the development of reservoir cascade projects, and the construction and operation processes were accompanied by the implementation of a set of compensatory measures of a fisheries' nature. Nevertheless, the functioning of a complex water management system and insufficient attention to environmental problems led to the emergence of new environmental, technical, and scientific problems that required an integrated approach for their solution, and the effectiveness of the planned measures turned out to be insufficient. The study of the consequences of seasonal regulation of runoff by reservoirs, changes in the estimates of water resources, the involvement of new methods of studying the hydrological system, including multi-arm channels, and the analysis of anthropogenic-altered river sections allowed to obtain new results but at the same time to formulate a block of unresolved scientific problems. Among such problems, there is a need to solve such engineering and hydrological tasks as increasing the feasibility of forecasts of inflow to reservoirs, long-term forecasting of long-term fluctuations in runoff under conditions of ongoing climate change, obtaining up-to-date estimates of negative processes—deformation of riverbeds under anthropogenic impact. The latter is very important for the downstream of the Volgograd Hydroelectric Power Station. In terms of predicting the behavior of the ecosystems of the Lower Volga, with an assessment of their stability, further development of methods for assessing permissible impacts, the development of monitoring systems for their condition is required. The management of the Volga-Kama cascade of reservoirs is a complex scientific and technical task. Today, this management is carried out on the basis of dispatching rules dating back more than a dozen years. It is shown that modern management should be based on a coordinated system of priorities, including environmental criteria. The required optimization formulation of the task of finding optimal cascade control can be based, for example, on the search for a compromise solution at the level of agreement of the parties. A set of environmental and water management problems unsolvable for decades has been formed in the northern part of the Volga-Akhtuba floodplain as well as in the zone of the Western-subtidal *ilmens* (system of lakes in the Volga River Delta). To solve these problems, new methods of studying ecological systems under severe anthropo-

genic stress and appropriate engineering approaches that allow a comprehensive approach to achieving sustainable water resources management are considered. The problem of poorly predictable fluctuations in the level of the Caspian Sea and the problem of water resource management in the region in conditions of conflicting interests of users are touched upon. The main measures are discussed, whose implementation will mitigate the consequences of flow regulation for the ecosystem of the Lower Volga. Among the important system principles, the need for a basin approach is noted, which involves, at a minimum, the development of a General Scheme for the Use of Water Resources of the Volga River.

Keywords: Lower Volga, Volga-Akhtuba floodplain, cascade of reservoirs, Western Sub-Steppe Ilmen, hydrological regime, changes because of flow regulation, water problems

REFERENCES

- Alexandrovsky A.Yu., Klimenko V.V., Tereshin A.G. *Osobennosti gidroenergetiki Rossii v izmenyayushchikhsya vneshnikh usloviyakh (na territorii Volzhsko-Kamskogo kaskada GES)* [Features of the Functioning of the Hydropower Industry of Russia in Changing External Conditions (on the Example of the Volga-Kama Cascade of Hydroelectric Power Plants)]. Alexandrovsky A.Yu., Klimenko V.V., Eds. Moscow: Energia Publ., 2016. 170 p.
- Bednaruk S.E., Motovilov Yu.G. Technology of information support in the management of cascades of reservoirs. *Hydrotech. Construct.*, 2017, no. 7, pp. 22–35. (In Russ.).
- Belyaev A.I., Pugacheva A.M., Korneeva E.A. Assessment of Ecosystem Services of Wetlands of the Volga-Akhtuba floodplain. *Sustainability*, 2022, vol. 18, no. 14, p. 11240.
<https://doi.org/10.3390/su141811240>
- Bolgov M.V., Buber A.L., Komarovskiy A.A., Lotov A.V. Searching for Compromise Solution in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 1. Strategic Planning. *Water Resour.*, 2018a, vol. 45, pp. 819–826.
<https://doi.org/10.1134/S0097807818050044>
- Bolgov M.V., Buber A.L., Komarovskiy A.A., Lotov A.V. Search for Compromise Decisions in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 2. Tactical Planning and Dispatching Control. *Water Resour.*, 2019, vol. 46, pp. 480–491.
<https://doi.org/10.1134/S0097807819030047>
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Filippova I.A. Bayesian prediction of minimum river runoff under nonstationary conditions of future climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, pp. 497–503.
<https://doi.org/10.3103/S1068373916070074>
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. Present-day variations of the minimum runoff of the Volga basin rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, pp. 187–194.
<https://doi.org/10.3103/S1068373914030078>
- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filippova I.A. River Runoff and Probabilistic Forecast of the Caspian Sea Level. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018b, vol. 43, pp. 639–645.
<https://doi.org/10.3103/S1068373918100023>
- Bolgov M.V., Krasnozhen G.F., Lyubushin A.A. *Kaspiiskoe more. Ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiya* [The Caspian Sea. Extreme Hydrological Events]. Khublaryan M.G., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2007. 380 p.
- Elakhovskiy S.B. *Gidroelektrostantsii v vodokhozyaystvennykh sistemakh. Voprosy optimizatsii rezhimov* [Hydroelectric Power Plants in Water Management Systems. Problems of Optimization of Modes]. Moscow: Energia Publ., 1979. 192 p.
- Katunin D.N. *Gidroekologicheskie osnovy formirovaniya ekosistemnykh protsessov v Kaspiiskom more i del'te reki Volgi* [Hydroecological Foundations of the Formation of Ecosystem Processes in the Caspian Sea and the Volga River Delta]. Astrakhan: FSUE "KaspNIRKh" Publ., 2014. 478 p.
- Kritskiy S.N., Korenistov D.V., Ratkovich D.Ya. *Kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya* [Fluctuations of the Caspian Sea Level]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 159 p.
- Kritskiy S.N., Menkel M.F. Fluctuations in the level of closed reservoirs. *Proc. Hydroproect*, 1964, no. 12, pp. 29–61. (In Russ.).
- Kuzmina Zh.V., Treshkin S.E. Assessment of changes in terrestrial ecosystems of the Lower Volga during over-regulation. *Arid. Ecosys.*, 2017, vol. 73, no. 4, pp. 22–34. (In Russ.).
- Lotov A.V. Computer visualization of the Edgeworth-Pareto shell and its application in intelligent decision support systems. *Inform. Tekhnol. Vychisl. Sist.*, 2002, no. 1, pp. 83–100. (In Russ.).
- Mnogoletnie kharakteristiki pritoka v krupneishie vodokhranilishcha RF. Nauchno-prikladnoi spravochnik* [Long-Term Characteristics of Inflow to the Largest Reservoirs of the Russian Federation. Scientific and Applied Reference]. Georgievskiy V.Yu., Ed. Moscow: "RPTS Ofort", 2017. 132 p.
- Nauchnoe obosnovanie meropriyatii, obespechivayushchikh ratsional'noe ispol'sovanie i ustoichivoe funktsionirovanie vodokhozyaystvennogo kompleksa Nizhnei Volgi, sokhranenie unikal'noi sistemy Volgo-Akhtubinskoi poimiy. Otchet o NIR, podgotovleniy v ramkakh realizatsii federal'noi tselevoy programmy "Razvitie vodokhozyaystvennogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii v 2012–2020 godakh" (v 4 chastyakh)* [Scientific Substantiation of Measures Ensuring Rational Use of Water Resources and Sustainable Functioning of the Water Management Complex of the Lower Volga, Preservation of the Unique System of the Volga-Akhtuba Floodplain].

- R&D Report Prepared Within the Framework of the Federal Target Program “Development of the Water Management Complex of the Russian Federation in 2012–2020” (in 4 parts). Moscow: GOIN, 2013–2016. (In Russ.).
- Privalskii V.E. *Klimaticheskaya izmenchivost' (stokhasticheskie modeli, predskazuemost', spektry)* [Climatic Variability (Stochastic Models, Predictability, Spectra)]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 183 p.
- Ratkovich D.Ya., Bolgov M.V. Investigation of probabilistic patterns of long-term fluctuations in the level of the Caspian Sea. *Water Resour.*, 1994, vol. 21, no. 4, pp. 389–404. (In Russ.).
- Ust'evaya oblast' Volgi: Gidrologo-morfologicheskie protsessy, rezhim zagryaznyayushchikh veshchestv i vliyaniye kolebaniy urovnya Kaspiiskogo morya* [The Estuary Region of the Volga: Hydrological and Morphological Processes, the Regime of Pollutants and the Influence of Fluctuations in the Level of the Caspian Sea]. Polonskii V.F., Mikhailov V.N., Kir'yanov S.V., Eds. Moscow: GEOS Publ., 1998.
- Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovaniye i prognoz* [Water Balance and Fluctuations of the Caspian Sea Level. Modeling and Forecasting]. Moscow: Triada Ltd. Publ., 2016. 378 p.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ В БАССЕЙНЕ ВОЛГИ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА В XXI в.

© 2023 г. Г. М. Черногаева^{a, b, *}, Л. Р. Журавлева^b, Ю. А. Малеванов^b

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

^bИнститут глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

*e-mail: gmchernogaeva@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Волга на протяжении нескольких столетий является главной рекой России. Река, берущая начало на Валдайской возвышенности, пересекает на своем пути в Каспийское море несколько природно-климатических зон: от южной тайги до сухих степей Прикаспийской низменности. По последним данным в бассейне реки располагается 31% площади посевов сельскохозяйственных культур, 43% основных фондов экономики, производится почти половина валового регионального продукта России. Антропогенная нагрузка на реку с притоками и их бассейнами значительно превышает нагрузку на другие крупные реки России. Наибольшие объемы загрязненных сточных вод приходятся на долю городов Москва, Самара, Нижний Новгород, Ярославль, Саратов, Уфа, Волгоград, Балахна, Тольятти, Ульяновск, Череповец, Набережные Челны и другие крупные города. Все эти негативные процессы происходят на фоне происходящих климатических изменений. В статье проанализированы данные гидрохимического мониторинга Росгидромета речных вод в бассейне Волги за период 2000–2021 гг. по водным объектам и субъектам Федерации. Независимо от водности года вода практически 70% створов гидрохимического мониторинга в бассейне Волги соответствуют третьему классу качества – “загрязненная”. Интегральная оценка качества вод в бассейне Волги показывает, что ситуация существенно не изменилась с конца прошлого века. Для улучшения экологического состояния бассейна Волги необходимо осуществление комплекса мер по охране и воспроизводству водных ресурсов на водосборных площадях, рационализация систем водопользования, сокращение объема забора свежей воды. Снижение водопотребления является необходимым условием сокращения объемов отводимых сточных вод и, следовательно, количества загрязняющих веществ, содержащихся в них. Одной из проблем является то, что почти все виды водопользования наносят вред природному качеству поверхностных вод, в том числе в бассейне Волги.

Ключевые слова: качество речных вод, гидрохимический мониторинг, природно-климатические зоны, административные территории

DOI: 10.31857/S2587556623060043, **EDN:** EEQTOY

ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящается оценке качества воды реки Волги, ее притоков и водохранилищ по химическим показателям. В основном Волга является равнинной рекой, за исключением левобережных притоков, берущих начало на западных склонах Уральских гор. На огромном протяжении основного русла (3690 км) река пересекает несколько природно-климатических зон: южной тайги, смешанных и широколиственных лесов, черноземных степей, а также сухих степей и полупустынных ландшафтов. Более 70% бассейна расположено в лесной зоне и в предгорной и горной частях Урала¹, где и формируется основная часть речно-

го стока. Именно здесь в бассейне Волги выпадает самое большое количество осадков (600 и более мм/год). На юге бассейна на Прикаспийской низменности осадки снижаются до 200 мм/год, что меньше, чем испаряемость. Минерализация и ионный состав атмосферных осадков также являются в значительной мере зональными (Никаноров, 2001). Зональная и минерализация местных вод (табл. 1). Зональность речных вод, особенно крупных рек, менее выражена из-за водообмена между природными зонами.

Воды в естественных условиях делятся на основные группы с преобладанием следующих ионов: 1) Cl^- и Na^+ ; 2) SO_4^{2-} и Na^+ ; 3) SO_4^{2-} и Ca^{2+} ; 4) SO_4^{2-} и HCO_3^- и Ca^{2+} ; 5) HCO_3^- и Ca^{2+} ; 6) HCO_3^- и Na^+ . По ионному составу в бассейне Волги преоб-

¹ <https://old.bigenc.ru/geography/text/1925622> (дата обращения 16.05.2023).

Таблица 1. Зональные природные гидрохимические характеристики вод

Тип вод	Минерализация по зонам, мг/л		
	лесная зона	лесостепная зона	степная зона
Склоновые	40–100	100–200	200–600
Почвенно-грунтовые	50–200	250–450	300–1000

Источник: (Скакальский, 1995).

ладают карбонатные речные воды. Сульфатно-хлоридные локально встречаются в ее нижнем течении.

Первые карты в основном естественной минерализации речных вод в различных природных зонах были созданы О.А. Алекиным (Алекин, 1953; Алекин, Бражникова, 1964). По существу, это первые карты качества поверхностных вод. Начиная с 1960-х годов, в связи с увеличением объема сточных вод, загрязненного стока с водосборов, перераспределением сезонных объемов воды в результате регулирования стока Волги водохранилищами произошли большие изменения качества воды, в основном в сторону его ухудшения — возросла минерализация, увеличилось содержание биогенов, микроэлементов, в воде появились ксенобиотики.

В последние десятилетия антропогенная нагрузка в бассейне Волги в 8 раз выше, чем в среднем по России. Здесь располагается 31% площади посевов сельскохозяйственных культур, 43% основных фондов экономики, производится почти половина валового регионального продукта². В связи с чрезмерной нагрузкой на окружающую среду, осуществлен целый ряд водоохраных мероприятий. Среди них в 2014 г. в рамках Национального стратегического проекта “Экология” был разработан федеральный проект “Оздоровление Волги”. Успех осуществления этого и других проектов улучшения качества воды Волги во многом зависит от наличия соответствующей достоверной информации. Долгое время она была эпизодической. Систематические мониторинговые наблюдения в рамках Государственной наблюдательной сети стали проводиться со второй половины прошлого века.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Исходными данными являются результаты мониторинговых наблюдений по пунктам, входящим в государственную наблюдательную сеть, за период 2000–2022 гг. Этот период был выбран с учетом понимания гидрологической и гидрохимической ситуации в бассейне Волги до 2014 г. и

анализа событий после начала реализации федерального проекта “Оздоровление Волги”. Для этой цели использовались следующие базы данных: метеорологические³, гидрологические⁴, гидрохимические⁵, а также Государственные доклады по водным ресурсам⁶ в части водозаборов и сбросов разных видов сточных вод. Все данные из указанных источников ежегодно анализируются в Обзорах современного состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации, а также в “Тенденциях и динамике загрязнений окружающей среды в Российской Федерации”, которые ежегодно размещаются на сайте Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ)⁷ и раз в десять лет публикуются в печатном виде.

Система комплексного мониторинга загрязнения окружающей среды стала складываться в стране в 1960-е годы XX в. на базе территориальных подразделений и научных институтов по средам под руководством руководителя Росгидромета Ю.А. Израэля [(Израэль, 1984); см. также (Тенденции ..., 2007, 2013, 2017) на сайте <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>]. В 1980-е годы она приняла следующий вид (рис. 1).

Система перманентных документов, регламентирующих качество поверхностных вод, была встроена в общую систему документов комплексных наблюдений, что позволяет анализировать ситуацию с учетом природных и антропогенных факторов.

В настоящее время гидрологическая сеть наблюдений в бассейне Волги насчитывает порядка 600 постов (Государственный ..., 2022). Гидрохимическая сеть наблюдений Росгидромета насчитывает 407 пунктов, 596 створов на 240 объектах.

³ Ежегодные доклады о состоянии климата. <http://www.igce.ru/climatechange/reports> (дата обращения 15.04.2023).

⁴ Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. http://www.hydrology.ru/ru/izdaniya_ggi_New (дата обращения 15.04.2023).

⁵ Качество поверхностных вод РФ. Ежегодное издание. <https://gidrohim.com/node/44> (дата обращения 15.04.2023).

⁶ <https://voda.gov.ru/regulatory/gosudarstvennye-doklady/> (дата обращения 15.04.2023).

⁷ <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения 15.04.2023).

² <https://www.pnp.ru/social/volga-stanet-chishhe-v-tri-raza.html> (дата обращения 12.04.2023).

Пункты разделены на четыре категории, с разными режимами наблюдений и количеством определяемых химических веществ с таким расчетом, чтобы выявить наиболее существенные изменения в качестве воды, которые особенно проявляются при сопоставлении данных на фоновых створах (≈ 500 м выше города или промузла) и контрольных створах (500–1000 м ниже последнего сброса сточных вод). Фоновые и контрольные створы были заложены с целью выявления источников загрязнения, в том числе промышленного и коммунального происхождения (ксенобиотики), для повышения эффективности всех видов воздушной и водной очистки. Это особенно важно, поскольку практически все возможные виды использования водных ресурсов негативно сказываются на качестве вод, в том числе в бассейне Волги.

После лабораторных анализов по единым методикам в Гидрохимическом институте проводится ранжирование по классам качества загрязненности воды — условное разделение всего диапазона состава и свойств природной воды в условиях антропогенного воздействия на различные интервалы с постепенным переходом от “условно чистой” до “экстремально грязной” по величинам комбинаторного индекса загрязненности воды с учетом ряда дополнительных факторов. В данной работе использованы следующие классы качества воды: 1 класс — условно чистая; 2 класс — слабо загрязненная; 3 класс — загрязненная; 4 класс — грязная; 5 класс — экстремально грязная⁸. В оценку класса качества входят такие показатели, как ВЗ (высокое загрязнение поверхностных вод — уровень загрязнения, превышающий ПДК в 3–5 раз для веществ 1 и 2 классов опасности, в 10–50 раз для веществ 3 и 4 классов, в 30–50 раз для нефтепродуктов, фенолов, ионов марганца, меди и железа), ЭВЗ (экстремально высокое загрязнение поверхностных вод — уровень загрязнения, превышающий ПДК в 5 и более раз для веществ 1 и 2 классов опасности и в 50 и более раз для веществ 3 и 4 классов), к которым часто приводят аварийные ситуации. Уровни ВЗ и ЭВЗ поверхностных вод оперативно поступают на серверы ИГКЭ и передаются в контролирующие инстанции, а также в виде отдельного информационного ресурса размещаются в ежегодных Обзорах⁹. Фиксируемое снижение случаев ВЗ и ЭВЗ в бассейне Волги связано с тем, что из состава загрязняющих веществ по указанию МПР РФ и Росгидромета были исключены взвешенные ве-

⁸ РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Методические указания. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 50 с.

⁹ <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения 15.04.2023).

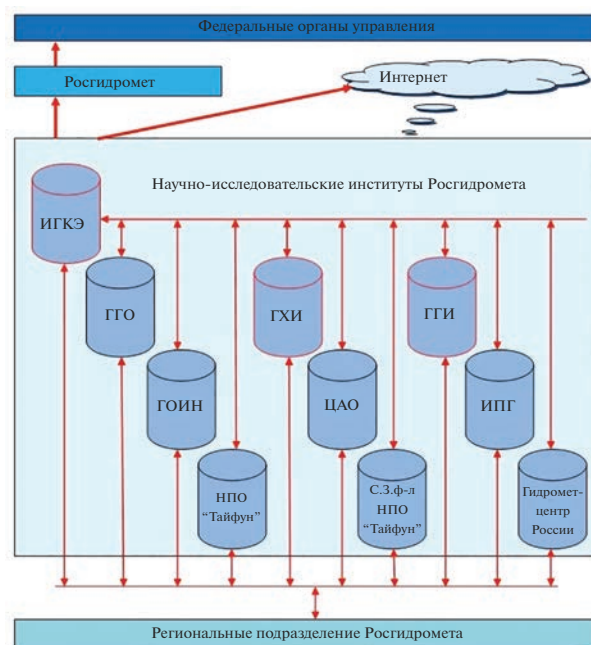


Рис. 1. Информационные потоки данных мониторинга загрязнения окружающей среды Росгидромета.

щества, несмотря на то, что в стране стандартом качества воды являются рыбохозяйственные ПДК (ПДК р/х), в том числе взвешенных веществ.

В данной работе рассматриваются гидрологические и гидрохимические среднегодовые характеристики воды бассейна Волги за 2000–2022 гг. В расчет принимались наблюдаемые данные из указанных выше источников. Использовались классические статистические методы. С целью учета данных мониторинга при реализации экологической политики страны требуются дальнейшие планы не только в области развития инструментального анализа, но и в совершенствовании методов интеграции данных мониторинга. В качестве примера можно привести работу авторов статьи по созданию Атласа водных ресурсов и их качества по данным мониторинга Росгидромета (Черногаева и др., 2019, 2021а, 2021б). Поскольку в статье речь идет о Волге, приведем только пример по Приволжскому федеральному округу (самому крупному в бассейне реки, площадь которого составляет 1037 км²). Комплект материалов был подготовлен на базе геоинформационной системы QuantumGIS. Визуализация данных проводилась по методике ранжирования данных (по 5-ти балльной шкале). Каждой группе ранжированных данных был задан определенный интервал и цвет (рис. 2).

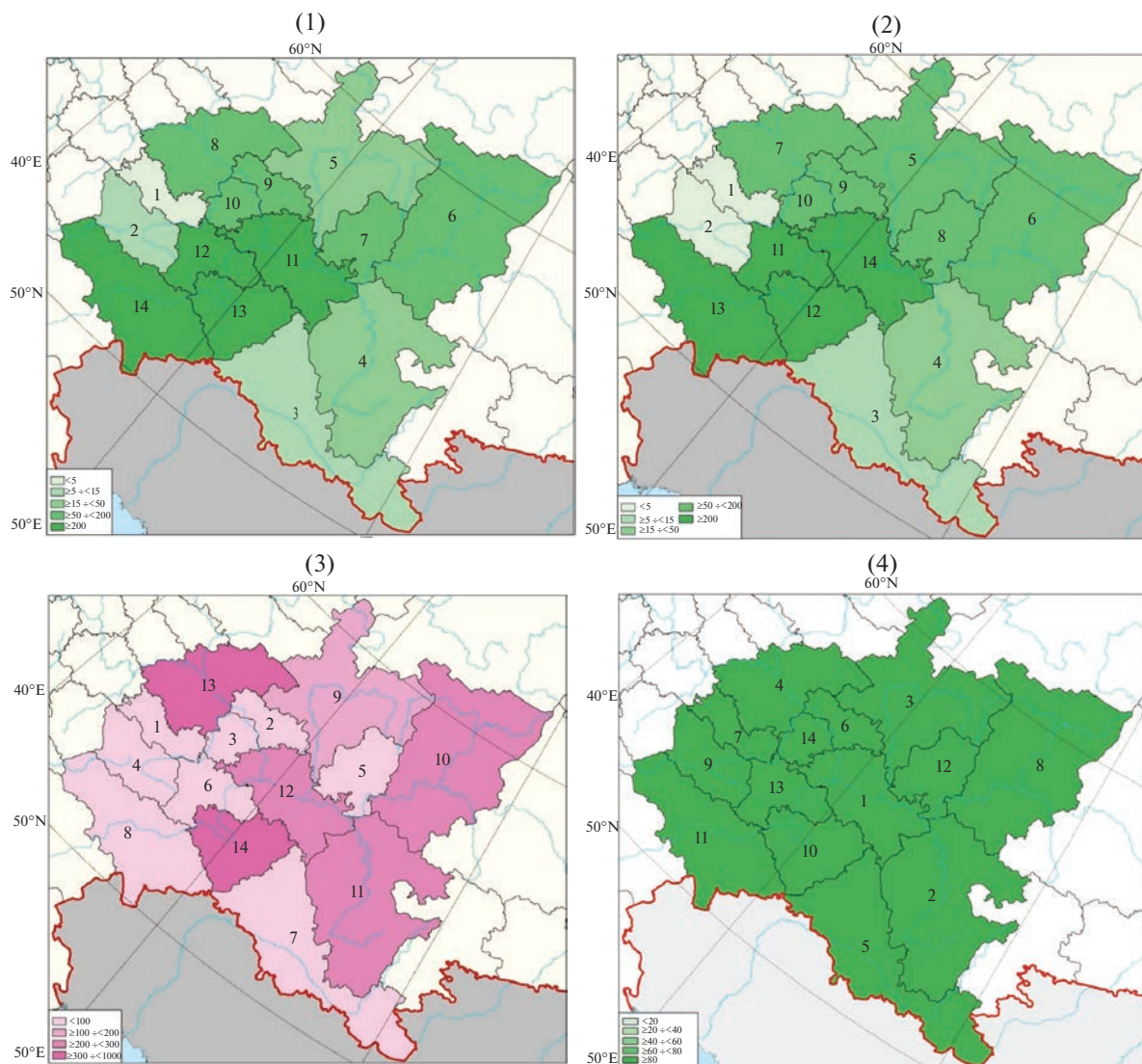


Рис. 2. Ресурсы речного стока и их качество в субъектах Приволжского ФО: (1) средние многолетние значения речного стока, км³/год; (2) речной сток в 2019 г., км³/год; (3) сбросы загрязненных сточных вод в водные объекты в 2019 г., млн м³/год; (4) наиболее загрязненные створы на пресноводных объектах в 2019 г., %. Цифры на картосхемах отражают ранг региона по каждому показателю.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как известно, на формирование химического состава поверхностных вод значительное влияние оказывают водность года и ее сезонное распределение. Если водность года корреляционно связана с количеством осадков, выпадающих в бассейне Волги, хотя и не всегда тесно, то сезонное распределение водности в целом по бассейну зависит от зарегулированности стока каскадом водохранилищ. На рис. 3 представлены графики атмосферных осадков и стока Волги за рассматриваемый период времени. При чередовании многоводных и маловодных лет отчетливо прослеживается тренд снижения как осадков, так и стока Волги. Несмотря на продолжающееся по-

тепление климата, природная зональность в выпадении атмосферных осадков не изменилась. По-прежнему большая часть стока Волги формируется в лесной зоне, в горах и предгорьях Урала, а максимальные значения осадков и стока наблюдаются в верховьях Камы и в ее притоках, берущих начало на западном склоне Уральских гор (Бардин, 2021).

В условиях зарегулированности стока Волго-Ахтубинская пойма и дельта Волги обводняются сбросами из Волгоградского водохранилища.

На водность и качество воды Волги влияет рост температуры воздуха в последние годы. Наиболее быстро он происходил в период 1991–2000 гг., когда она повысилась более чем на 1°C. В последние го-

ды рост температуры менее заметен, хотя наблюдается практически во все сезоны (Проблемы ..., 2021). При тренде снижения стока Волги (г/п с. В. Лебяжье) и большом заборе воды на орошение увеличиваются потери воды на испарение и снижается объем возвратных вод (Демин, 2016). Все это приводит к обмелению ряда рукавов дельты Волги, особенно в ее восточной части, падению уровня Северного Каспия (наряду с другими факторами). Однако анализ этой проблемы не входил в задачу настоящей работы.

Анализ данных режимных наблюдений на Волге показывает не только межгодовую вариативность качества воды, но и пространственную, связанную с изменяющейся антропогенной нагрузкой в широтном и меридиональном направлениях (рис. 4). На рисунке показаны основные створы из тех, по которым проводится полная программа наблюдений по большому количеству природных, природно-антропогенных химических показателей, в том числе и ксенобиотиков.

Объем статьи не позволяет привести картосхемы за весь рассмотренный период, но и так очевидно, что существует пространственно-временная вариация классов качества по водным объектам бассейна.

В течение многолетнего периода наблюдений в Волге, ее притоках и водохранилищах преобладали створы с “загрязненной” (3 класс качества) водой. Эта ситуация сложилась еще в конце прошлого века. Межгодовые вариации на разных створах связаны с переходами одних и тех же створов по качеству воды то в сторону улучшения, то ухудшения, изменяясь практически на один класс качества (табл. 2).

Как видно из рис. 5, в течение 2010–2021 гг. количество створов с “загрязненной” водой 3-го класса качества варьировало от 58.5% в 2010 до 67.2% в 2021 г. В 2021 г. количество створов с качеством воды 3 и 4 классов составило 95% от их общего числа (в 2010 г. — 99.1%). Увеличение количества створов с качеством воды 3 класса происходило за счет перехода качества воды одних и тех же створов в 4 или 2 класс. Однако анализ свидетельствует, что формализованный тренд не показывает реальной ситуации каждого года. Для принятия превентивных мер нужен прогноз и анализ каждого конкретного года.

Необходимо отметить, что практически из года в год во всех субъектах РФ, входящих в бассейн Волги, наблюдаются створы с “экстремально грязной” водой. Прежде всего это относится к Московской, Нижегородской, Астраханской областям. Количество случаев ВЗ и ЭВЗ практически не снижается (рис. 6).

Поверхностные воды бассейна Волги испытывают антропогенную нагрузку разного масштаба. Загрязнение бассейна связано с поступлением

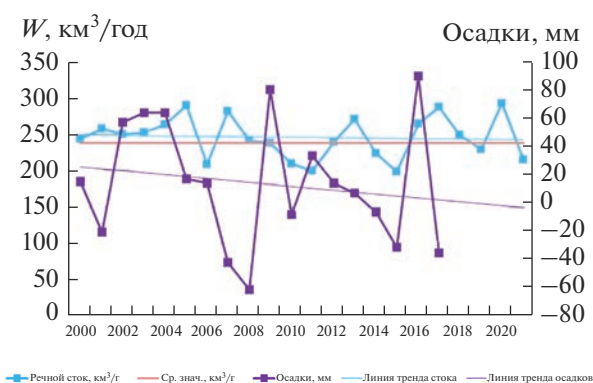


Рис. 3. Водные ресурсы бассейна Волги и атмосферные осадки.

сточных вод промышленных предприятий, многочисленных сельскохозяйственных объектов и канализационных систем населенных пунктов. Наибольшие объемы загрязненных сточных вод приходится на долю городов Москва, Самара, Нижний Новгород, Ярославль, Саратов, Уфа, Волгоград, Балахна, Тольятти, Ульяновск, Череповец, Набережные Челны и др. Значительное количество загрязняющих веществ поступает в Волгу с водой Оки (Водные ..., 2008; Никаноров, 2001; Обзор ..., 2022).

Критическими веществами, влияющими на качество воды бассейна Волги в разные годы и в разных створах, в течение многолетнего периода являются органические вещества по ХПК и БПК₅, нитритный и нитратный азот, соединения меди, железа, цинка, марганца, алюминия, мо-

Таблица 2. Распределение количества створов в бассейне Волги, %

Год	Створы по классам качества воды				
	1-й класс	2-й класс	3-й класс	4-й класс	5-й класс
2010	—	0.9	58.5	40.6	—
2011	0.17	2.49	57.6	39.21	0.53
2012	—	2.84	53.4	42.88	0.88
2013	0.18	3.73	54	41.55	0.54
2014	0.36	5.54	62.2	31.2	0.7
2015	0.17	2.65	58.9	37.76	0.52
2016	—	3.51	62.2	33.59	0.7
2017	0.53	3.31	61.5	34.14	0.52
2018	0.17	3.28	68.3	27.9	0.35
2019	0.2	4.5	71.2	23.1	1
2020	0.3	3.4	70.8	24.1	1.4
2021	—	4.2	67.2	27.8	0.8

Источник: Качество поверхностных вод РФ. Ежегодное издание. <https://gidrohim.com/node/44> (дата обращения 15.04.2023).

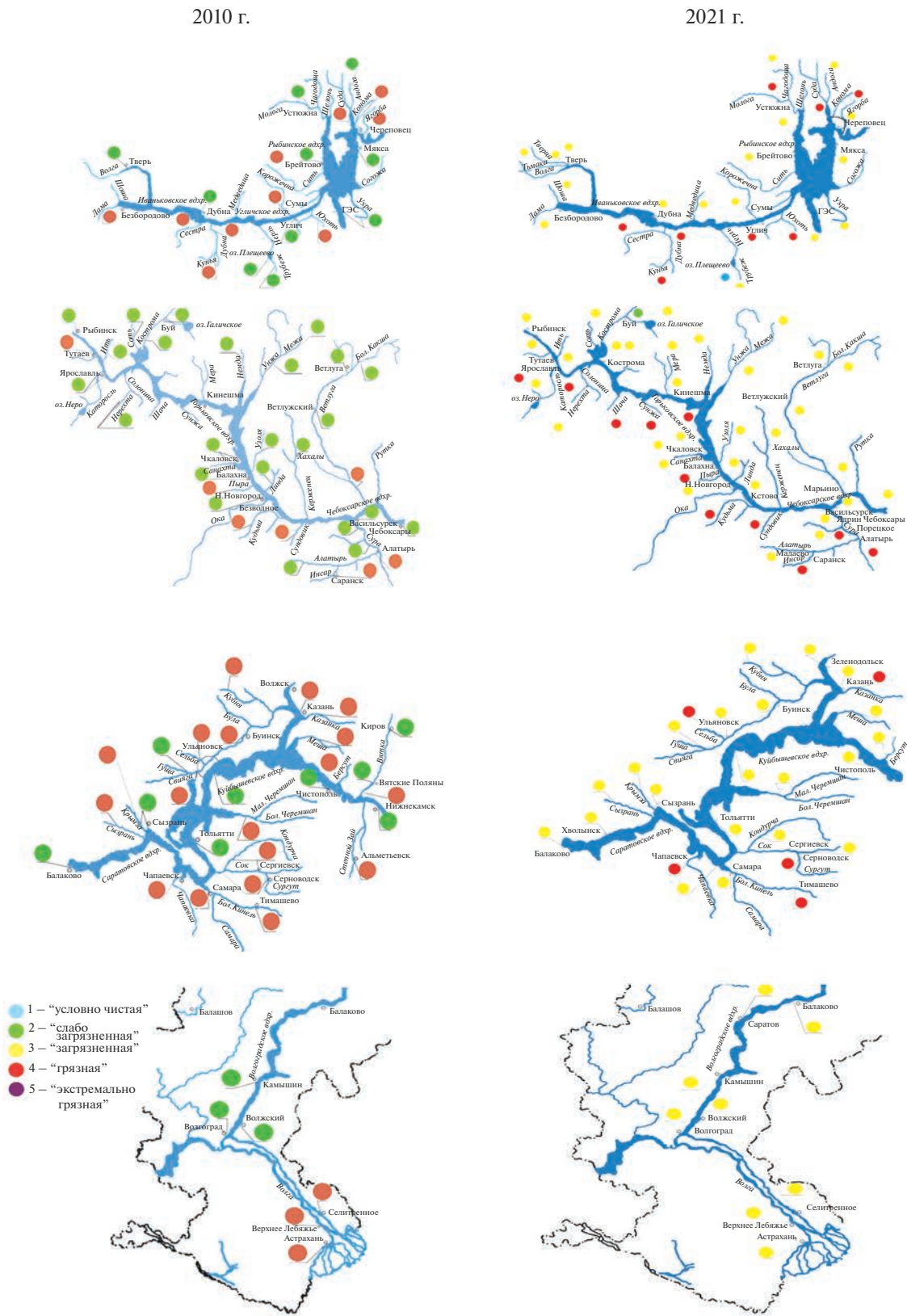


Рис. 4. Комплексная оценка качества поверхностных вод в бассейне Волги от Твери до Астрахани в 2010 и 2021 гг.

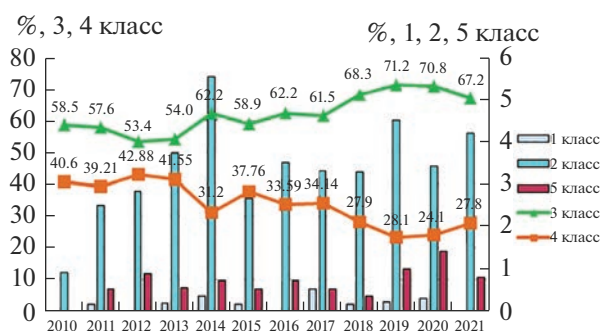


Рис. 5. Распределение количества створов в бассейне Волги по классам качества воды за период 2010–2021 гг., %.

либдена, нефтепродукты, иногда фенолы, формальдегид, шестивалентный хром, фосфор фосфатов и др.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

К настоящему времени накопилось огромное количество научных публикаций и монографий, посвященных геоэкологическим проблемам Волги, в которых часто приводятся противоречивые оценки. Уже несколько лет осуществляется работа по проекту “Оздоровление Волги”. Однако противоречия в методиках и оценках сохраняются, и более или менее объективный анализ результатов многочисленных научных разработок до сих пор не проведен (Водные ..., 2008; Государственный ..., 2022; Демин, 2016; Диффузное ..., 2020; Загрязняющие ..., 2017; Коротаев, 2012; Проблемы ..., 2021; Экстремальные ..., 2010).

Следует отметить, что практически во всех научных публикациях отмечается, что качество поверхностных вод в бассейне Волги сохраняется неудовлетворительным. Авторы отмечают разные причины сложившейся ситуации. Тем не менее можно с уверенностью утверждать, что в комплексе они одни и те же: выработка ресурсов очистных сооружений, неконтролируемый диффузный сток, прежде всего с сельскохозяйственных угодий и селитебных территорий.

Реализация федерального проекта была рассмотрена в августе 2017 г. на Президиуме Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам. В результате был утвержден паспорт приоритетного проекта “Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волга”¹⁰.

Авторы статьи считают уместным процитировать основную цель проекта — улучшить экологическую ситуацию в бассейне р. Волги за счет со-

¹⁰<http://government.ru/projects/selection/670/29362/> (дата обращения 17.04.2023).

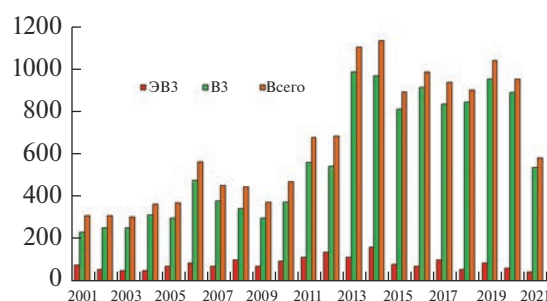


Рис. 6. Количество случаев высокого и экстремально высокого загрязнения в бассейне Волги (в 2020–2021 гг. — без учета взвешенных веществ).

кращения не менее чем на 80% объема сбросов загрязненных сточных вод в водные объекты Волжского бассейна и мероприятий по оздоровлению Волго-Ахтубинской поймы. Срок реализации проекта — с 30 августа 2017 до конца 2025 г. Предусматривалось, что реализация приоритетного проекта позволит сократить долю загрязненных сточных вод от общего объема сточных вод до 10% в 2025 г. за счет применения наилучших доступных технологий их очистки.

В рамках реализации проекта предстояло инвентаризировать объекты, которые оказывают негативное воздействие на водные объекты, охватить автоматизированными системами и лабораториями контроль за составом, объемом или массой сточных вод не менее 30% таких объектов в 2018 и 100% в 2025 г.

Реализация приоритетного проекта осуществляется через региональные проекты по сохранению и предотвращению загрязнения р. Волги¹¹.

Однако в результате парламентских слушаний 6 марта 2023 г. было принято решение продлить проект еще на пять лет — с 2025 до 2030 г. в рамках единого проекта оздоровления рек и озер России. Поручение о его подготовке дал Президент РФ В.В. Путин в Послании к Федеральному собранию 21.02.2023 г. Предложения, прозвучавшие на парламентских слушаниях, войдут в рекомендации Правительству, парламенту, регионам. Например, Правительству предложили подумать об усилении ответственности за загрязнение воды продуктами нефтедобычи, разработать систему льгот для российских производителей и при подготовке нового проекта экологического оздоровления рек предусмотреть подъем затонувших судов¹².

Реконструкция и строительство новых очистных сооружений на существующих заводах, расчистка русел и подъем затонувших судов должны

¹¹<http://government.ru/projects/selection/670/> (дата обращения 18.04.2023).

¹²<https://www.pnp.ru/social/volga-stanet-chishhe-v-tri-raza.html> (дата обращения 23.04.2023).

привести к улучшению качества поверхностных вод в бассейне Волги. Однако не следует забывать, что существует неконтролируемый сток с сельскохозяйственных угодий, селитебных территорий и федеральных трасс.

Считаем необходимым остановиться на следующем вопросе. Введение в 1992 г. в РФ платы за превышение нормативов допустимого сброса загрязняющих веществ в водные объекты, рассчитанных на основе нормативов ПДК р/х, привело к тому, что охрана водного объекта от загрязнения превратилась только в необходимость соблюдения в воде водных объектов нормативов ПДК р/х, значения показателей которых установлены без учета природных особенностей водных объектов, особенностей режима зарегулирования речных систем, техногенной нагрузки на водные объекты. Вместе с тем отсутствует информация, подтверждающая улучшение качества воды и состояние водных объектов при соблюдении действующих рыбохозяйственных нормативов качества воды и установленных на их основе нормативов допустимого сброса. Для большинства отраслей промышленности соблюдение ПДК р/х стало невозможным без применения дорогостоящих очистных сооружений, составляющих около трети стоимости всего промпредприятия и не обеспечивающих выполнение установленных требований.

Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об охране окружающей среды” и отдельные законодательные акты Российской Федерации» определил переход промышленности на технологическое нормирование на основе наилучших доступных технологий, изменил систему выдачи разрешений на право пользования водным объектом и разрешений на сброс загрязняющих веществ, но не изменил требований Водного кодекса РФ в области регулирования воздействия хозяйственной и иной деятельности на водные объекты. Переход на технологическое нормирование направлен на достижимый уровень очистки загрязненных сточных вод, в то же время в соответствии с Федеральным законом от 10 января 2002 года № 7-ФЗ “Об охране окружающей среды” основной целью перехода на технологическое нормирование является применение технологических показателей, соответствующих показателям наилучшей доступной технологии, определяемой на основе современных достижений науки и техники, и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды и целей охраны водных объектов, в том числе, на основе поэтапного достижения природоохранных нормативов качества вод.

ВЫВОДЫ

Качество воды в основном русле Волги, ее притоках и водохранилищах имеет большую пространственно-временную вариабельность в течение каждого конкретного года.

Несмотря на то, что в бассейне Волги происходили изменения качества воды как в лучшую, так и в худшую сторону, уменьшился сброс загрязненных сточных вод, сложившийся отрицательный эффект влияния хозяйственной деятельности на поверхностные воды в целом не скомпенсировался и состояние качества воды остается неблагоприятным.

Количество створов с уровнем загрязненности воды 3 и 4 класса качества, когда среднегодовая концентрация одного или нескольких загрязняющих веществ составляла или превышала 10 ПДК, практически не меняется. В 2020–2021 гг. количество таких створов снизилось за счет исключения из приоритетного списка взвешенных веществ.

Качество воды Волги за последние двадцать лет не улучшилось, несмотря на проведение водоохраных мероприятий. Гидрологи, гидрохимики, экологи сходятся во мнении о необходимости проведения комплексного перманентного (ежегодного) контроля за гидроэкологией во всех водных объектах бассейна Волги. Результаты научных исследований, проведенных в начале XXI в., должны быть использованы при подготовке запланированного проекта МПР “Чистая вода” на период с 2025 по 2030 г. Очень важно при этом, чтобы были предусмотрены меры, в первую очередь законодательные, в области охраны водных объектов на основе принципов экологического (природоохранного) нормирования, заявленных в Водной стратегии РФ на период до 2020 г. (утв. распоряжением Правительства РФ от 27.08.2009 № 1235-р), учитывающих природные особенности региона, факторы формирования регионального фона, индивидуальные характеристики водных объектов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMGE-2019-0007 (AAAA-A19-119021990093-8).

FUNDING

The study was carried out within the framework of the state assignment FMGE-2019-0007 (AAAA19-119021990093-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алекин О.А. Основы гидрохимии. Учеб. пособие. Л.: Гидрометеиздат, 1953. 296 с.

- Алекин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. М.: Наука, 1964. 143 с.
- Бардин М.Ю., Самохина О.Ф., Непоменко Л.Ф. Климатические изменения // Проблемы загрязнения устьевой области Волги / отв. ред. Е.В. Островская. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2021. С. 38–41.
- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Гос. гидрологический ин-т, 2008. 600 с.
- Государственный доклад “О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2021 году”. М.: НИИ-Природа, 2022. 290 с.
- Демин А.П. Сточные воды и качество воды в бассейне реки Волга (2000–2015 гг.) // Гидроэкология. Ученые записки. 2016. № 3. С. 55–71.
- Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.
- Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна / отв. ред. В.Ф. Бреховских, Е.В. Островская. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2017. 408 с.
- Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеиздат, 1984. 560 с.
- Кортаев В.Н. Очерки по геоморфологии береговых и устьевых систем: Избранные труды / отв. ред. В.А. Снытко. М.: Географический ф-тет МГУ, 2012. 540 с.
- Никаноров А.М. Гидрохимия. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 448 с.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 г. / отв. ред. Г.М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2022. 220 с.
- Проблемы загрязнения устьевой области Волги / отв. ред. Е.В. Островская. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2021. 328 с.
- Скальский Б.Г. Географические закономерности формирования вод местного стока и их химического состава // Географические направления в гидрологии. М.: Изд. РАН, Русское географическое общество, 1995. С. 151–167.
- Черногаева Г.М., Жадановская Е.А., Журавлева Л.Р., Малеванов Ю.А. Загрязнение окружающей среды в регионах России в начале XXI века. Коллективная монография / отв. ред. А.А. Тишков. М.: ООО “ПОЛИГРАФ-ПЛЮС”, 2019. 232 с.
- Черногаева Г.М., Малеванов Ю.А., Галушин Д.А. и др. Атлас водных ресурсов и их качества по данным мониторинга Росгидромета за 2019 год. М.: ООО “Принт”, 2021а. 49 с.
- Черногаева Г.М., Малеванов Ю.А., Журавлева Л.Р. Современный уровень загрязненности вод дельты р. Волги // Проблемы загрязнения устьевой области Волги / отв. ред. Е.В. Островская. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2021б. С. 151–163.
- Экстремальные гидрологические ситуации / отв. ред. Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева. М.: ООО “Медиа-ПРЕСС”, 2010. 464 с.

Integral Assessment of Water Quality in the Volga River Basin According to Monitoring Data in the 21st Century

G. M. Chernogaeva^{1, 2, *}, L. R. Zhuravleva², and Y. A. Malevanov²

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia*

*e-mail: gmchernogaeva@gmail.com

The Volga River has been the main Russian river for several centuries. The river, originating on the Valdai Hills, crosses several natural and climatic zones on its way to the Caspian Sea: from the southern taiga to the dry steppes of the Caspian Lowland. According to the latest data, 45% of industrial enterprises and 50% of agricultural production in Russia are concentrated in the river basin. The anthropogenic load on the river with its tributaries and their basins significantly exceeds the load on other large Russian rivers. The largest contaminated wastewater volumes fall on the share of Moscow, Samara, Nizhny Novgorod, Yaroslavl, Saratov, Ufa, Volgograd, Balakhna, Tolyatti, Ulyanovsk, Cherepovets, Naberezhnye Chelny and other large cities. All these negative processes occur against the background of ongoing climate change. The article analyzes the Roshydromet hydrochemical monitoring data of river waters in the Volga River basin for the 2000–2021 period by water bodies and federal subjects. Regardless of the year water content, almost 70% of hydrochemical monitoring stations in the Volga River basin correspond to the third quality class (“polluted”). An integral assessment of the water quality in the Volga River basin shows that the situation has not changed significantly since the end of the last century. To improve the ecological condition of the Volga River basin, it is necessary to implement a set of measures for the protection and reproduction of water resources in catchment areas, rationalize water use systems, and reduce the volume of freshwater intake. Reducing water consumption is a necessary condition for reducing the wastewater volume discharged and, consequently, the number of pollutants contained in it. One of the problems is that almost all types of water use harm the surface waters’ natural quality, including the Volga River basin.

Keywords: river water quality, hydrochemical monitoring, natural and climatic zones, administrative territories

REFERENCES

- Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii. Uchebnoe posobie* [Fundamentals of Hydrochemistry. Tutorial]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1953. 296 p.
- Alekin O.A., Brazhnikova L.V. *Stok rastvorenykh veshchestv s territorii SSSR* [Drainage of Dissolved Substances From the Territory of the USSR]. Moscow: Nauka Publ., 1964. 143 p.
- Bardin M.Yu., Samokhina O.F., Nepomenko L.F. Climate change. In *Problemy zagryazneniya ust'evoi oblasti Volgi* [Problems of Pollution of the Mouth Area of the Volga]. Astrakhan: Sorokin R.V. Publ., 2021, pp. 38–41. (In Russ.).
- Chernogaeva G.M., Malevanov Yu.A., Galushin D.A. et al. *Atlas vodnykh resursov i ikh kachestva po dannym monitoringa Rosgidrometa za 2019 god* [Atlas of Water Resources and Their Quality According to Roshydromet Monitoring Data for 2019]. Moscow: Print Publ., 2021a. 49 p.
- Chernogaeva G.M., Malevanov Yu.A., Zhuravleva L.R. The current level of water pollution in the Volga River basin. In *Problemy zagryazneniya ust'evoi oblasti Volgi* [Problems of Pollution of the Mouth Area of the Volga]. Astrakhan: Sorokin R.V. Publ., 2021b, pp. 151–163. (In Russ.).
- Chernogaeva G.M., Zhadanovskaya E.A., Zhuravleva L.R., Malevanov Yu.A. *Zagryaznenie okruzhayushchei sredy v regionakh Rossii v nachale XXI veka. Kollektivnaya monografiya* [Environmental Pollution in the Regions of Russia at the Beginning of the XXI Century. Collective Monograph]. Tishkov A.A., Ed. Moscow: Poligraf-Plyus Publ., 2019. 232 p.
- Demin A.P. Wastewater and water quality in the Volga River Basin (2000–2015). *Gidroekol. Uchen. Zapiski*, 2016, no. 3, pp. 55–71. (In Russ.).
- Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions]. Danilov-Danilyan V.I., Ed. Moscow: Akad. Nauk Publ., 2020. 512 p.
- Ekstremal'nye gidrologicheskie situatsii* [Extreme Hydrological Situations]. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S., Eds. Moscow: Media-Press Publ., 2010. 464 p.
- Izrael Yu.A. *Ekologiya i kontrol' sostoyaniya prirodnoi sredy* [Ecology and Control of the State of the Natural Environment]. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1984. 560 p.
- Korotaev V.N. *Ocherki po geomorfologii beregovykh i ust'evykh sistem: Izbrannye trudy* [Essays on the Geomorphology of Coastal and Estuary Systems: Selected Works]. Snytko V.A., Ed. Moscow: MSU Publ., 2012. 540 p.
- Nikanorov A.M. *Gidrokhiimiya* [Hydrochemistry]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2001. 448 p.
- Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy v Rossiiskoi Federatsii za 2021 god* [Review of the State and Pollution of the Environment in the Russian Federation for 2021]. Chernogaeva G.M., Ed. Moscow: Rosgidromet Publ., 2022. 220 p.
- O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu. Gosudarstvennyi doklad* [On the State and Use of Water Resources of the Russian Federation in 2021. Government Report]. Moscow: NIA-Priroda Publ., 2022. 290 p.
- Problemy zagryazneniya ust'evoi oblasti Volgi* [Problems of Pollution of the Mouth Area of the Volga]. Ostrovskaya E.V., Ed. Astrakhan: Sorokin R.V. Publ., 2021. 328 p.
- Skakal'skii B.G. Geographic patterns of formation of local runoff waters and their chemical composition. In *Geograficheskie napravleniya v gidrologii* [Geographic Directions in Hydrology]. Moscow: Akad. Nauk Publ., Russ. Geogr. O-vo Publ., 1995, pp. 151–167. (In Russ.).
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanov I.A., Ed. St. Petersburg: Gos. Gidrol. Inst. Publ., 2008. 600 p.
- Zagryaznyayushchie veshchestva v vodakh Volzhsko-Kaspiiskogo basseina* [Pollutants in the Waters of the Volga-Caspian Basin]. Brekhovskikh V.F., Ostrovskaya E.V., Eds. Astrakhan: Sorokin R.V. Publ., 2017. 408 p.

УДК 574.5;556.535.8;574.583;561.26

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ДВУХ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

© 2023 г. Л. В. Разумовский^а, *, Т. Н. Кушнарева^а, В. Л. Разумовский^а, А. В. Анисимова^а

^аИнститут водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: lazy-lion@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2023 г.

После доработки 27.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

В работе изложена новая программа исследований по оценке долговременных трансформаций, происходящих в водохранилищах. Для оценки перспективности предложенных исследований были выбраны Ивановское и Рыбинское водохранилища. Это определялось длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений и степенью изученности. Новизна исследований состояла в совместном анализе результатов биомониторинга по фитопланктонным комплексам и анализа видового состава диатомовых комплексов из колонок донных отложений. Параллельно проводился анализ химического состава вод и образцов из колонок донных отложений. Методом графического анализа таксономических пропорций в диатомовых комплексах было доказательно продемонстрировано отсутствие процессов переотложения при формировании осадков в точках отбора колонок донных отложений. Это определило корректность сопоставления результатов диатомового и химического анализа осадков. По данным мониторинга рассмотрены результаты оценки качества вод по двум индексам: индексу сапробности *S* и интегральному индексу качества вод *QI*. Констатируется ожидаемая сезонная повторяемость численных значений *S* и *QI*. Аналогичные расчеты были проведены по видам-индикаторам из диатомовых комплексов в образцах из колонок донных отложений. Отмечены процессы ухудшения качества вод по вышеупомянутым индексам. В результате проведенных исследований было установлено оптимальное месторасположение точек отбора колонок донных отложений в Рыбинском и Ивановском водохранилищах. При образовании водохранилищ произошло затопление озер, расположенных на их территории. Образовавшийся рельеф дна определил зоны месторасположения реликтовых озер как зоны устойчивой седиментации. По результатам проведенных комплексных исследований установлены долговременные негативные процессы в обоих водохранилищах, обусловленные антропогенной нагрузкой.

Ключевые слова: водохранилище, комплексный мониторинг, качество воды, фитопланктон, диатомовые водоросли, донные отложения, индекс загрязнения вод, индекс сапробности

DOI: 10.31857/S2587556623060122, **EDN:** DHXGKM

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день объективная оценка возобновляемых ресурсов пресных вод и достоверный анализ их качества являются приоритетными направлениями как гидрологической науки, так и практики управления водными ресурсами. Накопление значительных масс загрязняющих веществ в донных отложениях (ДО) верхневолжских водохранилищ, являющихся источниками водоснабжения городов, в том числе Москвы, ставит проблему оценки рисков, связанных с возможным изменением качества их вод и сохранением устойчивости экосистем водохранилищ.

За прошедшие десятилетия их берега и ложа претерпели существенные трансформации. Значимой проблемой последних десятилетий являет-

ся нерегулируемый и неконтролируемый характер застройки прибрежных зон. Нелинейность и стохастичность антропогенного воздействия на экосистемы водохранилищ приводят к устойчивому формированию группы неоправданных рисков при их эксплуатации.

В 2017 г. сотрудниками ИВП РАН была предложена новая программа оценки долговременных трансформаций, происходящих в водохранилищах, по образцам из колонок ДО (Разумовский, 2021). Новизна исследований состояла в совмещении двух традиционных методов: анализа диатомовых комплексов из колонок ДО, который применяется в палеолимнологии, и анализа фитопланктонных комплексов, который применяется при биомониторинге. В качестве объекта

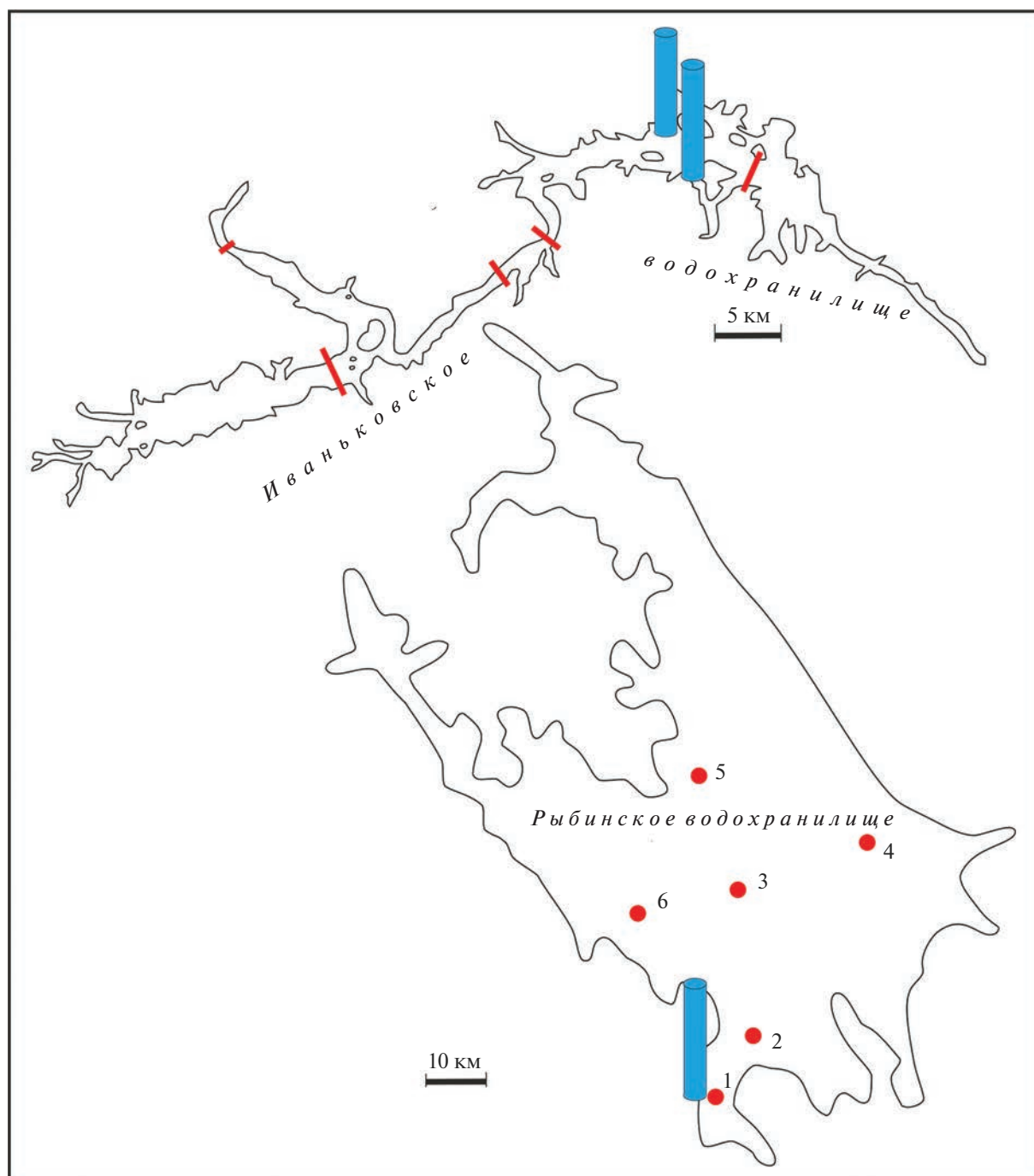


Рис. 1. Картохема комплексного мониторинга Иваньковского и Рыбинского водохранилищ. Красным цветом обозначены пункты и створы мониторинга; цилиндрическими фигурами синего цвета — места отбора колонок донных отложений.

исследований были выбраны Иваньковское и Рыбинское водохранилища (рис. 1). Это определялось длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений и степенью изученности.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Целью проведенных исследований является апробация нового метода по выявлению долговременных негативных изменений, происходящих в экосистемах водохранилищ.

1. Выбрать водохранилища для демонстрации эффективности предложенного метода исследований.

2. Провести инвентаризацию всех ранее полученных первичных данных для этих водохранилищ с их последующей систематизацией и анализом.

3. Определить зоны устойчивой седиментации¹ в этих водохранилищах, и отсутствие в этих зонах дальнейших процессов переотложения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Структуру и объем первичного материала составили 186 фитопланктонных проб, отобранных в Ивановском и Рыбинском водохранилищах, и 243 образца из 4 колонок ДО, отобранных в этих водохранилищах. Отбор проб проводился в 2017–2019 гг.

Колонки ДО из Ивановского водохранилища были отобраны в районе Перетрусовского залива (56.810355, 36.924684), между малыми островами и западной оконечностью о. Грабиловка (далее – Острова) (56.784824, 36.931571) и в Видогощинском заливе на участке, где располагалось затопленное оз. Видогошь (56.702412, 36.368875) (см. рис. 1).

Колонка ДО из Рыбинского водохранилища была отобрана в районе Коприно (58.092026, 38.297990). Пробы на Ивановском водохранилище отбирались на 5 створах, а на Рыбинском водохранилище в 5 пунктах постоянного мониторинга (см. рис. 1).

В качестве базового метода исследований был выбран диатомовый анализ (Диатомовый ..., 1949). Это объясняется рядом отличительных свойств диатомовых водорослей. Диатомовые водоросли – микроскопические одноклеточные организмы, которые являются одной из структурообразующих групп в большинстве пресноводных экосистем, в том числе водохранилищ. Обладая кремнийорганическим панцирем, отмершие клетки диатомовых водорослей хорошо сохраняются в пресноводных осадках и достоверно идентифицируются. Кроме того, существует обширная биоиндикационная база данных по приуроченности тех или иных видов диатомовых водорослей к конкретным условиям гидрологической среды.

Гидрохимический и гидробиологический мониторинг проводился по створам и пунктам в соответствии с ранее разработанными схемами (см. рис. 1). Обработка и просмотр фитопланктонных проб осуществлялся по стандартным ме-

тодикам (Руководство ..., 1992). Химические анализы проб воды проводили в лабораториях Института водных проблем РАН по стандартным методикам (Руководство ..., 1977).

Обработка проб из ДО, изготовление постоянных препаратов, подсчет и идентификация створок диатомей осуществлялись по стандартным методикам (Давыдова, 1985; Renberg, 1990).

Всего из колонок ДО было изучено более 100 образцов на диатомовый анализ. В тех же образцах был проанализирован химический состав ДО (металлы, соединения фосфора, азота и др.). Исследования проводились в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН. Анализ проводился атомно-эмиссионными и масс-спектральными методами с индуктивно-связанной плазмой. Подробное описание методики изложено в (Karandashev et al., 2016).

Для сравнительного анализа гидрохимических и гидробиологических проб были рассчитаны два индекса: индекс сапробности S и индекс загрязненности вод ИЗВ (water pollution index, WPI). Индекс сапробности S по Сладечеку (Sládeček, 1973) был рассчитан по фитопланктонным комплексам (Руководство ..., 1992). Исходной информационной базой данных для расчета его численных значений послужила работа (Барина и др., 2006).

Гидрохимический ИЗВ установлен Госкомгидрометом СССР (Временные ..., 1986) и относится к категории показателей, наиболее часто используемых для оценки качества водных объектов. Этот индекс является типичным аддитивным коэффициентом и представляет собой среднюю долю превышения ПДК по строго лимитированному числу индивидуальных ингредиентов (загрязняющих веществ), в нашем случае – шести:

$$WPI = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{c_i}{ПДК_i}}{6}, \quad (1)$$

где c_i – концентрация ингредиента i (в ряде случаев, например БПК₅, – значение физико-химического параметра); ПДК _{i} – установленная величина норматива (предельно допустимая концентрация) ингредиента i .

ИЗВ рассчитывают строго по шести показателям, имеющим наибольшие значения приведенных концентраций, независимо от того, превышают они ПДК или нет. Расчеты ИЗВ для Ивановского водохранилища проводились по следующим 6 параметрам: БПК₅, концентрации растворенного кислорода (O₂), железа (Fe), марганца (Mn), нефтепродуктов и иона аммония (NH₄⁺). В группу преваляющих загрязняющих компонентов были

¹ В палеолимнологии под зонами устойчивой седиментации подразумеваются участки дна, для которых характерны низкие и равномерные темпы осадконакопления. В этом случае осадки содержат достоверную хронологию событий прошлого, которую можно расшифровать с высоким временным разрешением (Соломина и др., 2013).

включены два параметра, имеющие выраженный антропогенный генезис: нефтепродукты и NH_4^+ . Таким образом, при расчете ИЗВ учитывался комплекс загрязняющих веществ, сбрасываемых в исследуемый водоем в значительных концентрациях.

Помимо стандартных (типовых) индексов к проведенным расчетам был привлечен интегральный индекс качества QI. Методика расчета QI основана на совмещении гидрохимических и гидробиологических данных (Зеленевская, 1998, 2011).

В отличие от методики ИЗВ, по которой предусмотрено применение средних значений химических ингредиентов, для расчета интегрального индекса использовались концентрации химических веществ на каждой станции, в каждый данный момент времени. Это способствовало проявлению экстремальных значений по некоторым показателям и регистрации комплексного загрязнения, приближенного к реальному для данного времени исследования.

По формуле для вычисления средней взвешенной величины, учитывающей значение WPI на каждой станции отбора и соответствующие характеристики численности (например: 1 — случайные находки, 3 — частая встречаемость, 5 — массовое развитие) выбранных видов-индикаторов, рассчитана экологическая валентность каждого из них:

$$e_k = \frac{\sum_j P_{kj} \text{WPI}_j}{\sum_j P_{kj}}, \quad (2)$$

где e_k — экологическая валентность вида k , P_{kj} — характеристика численности вида k в пробе j , WPI_j — значение ИЗВ в месте отбора пробы j , рассчитанное по формуле (1). Если вид k в пробе j не встречался, полагаем $P_{kj} = 0$.

Далее рассчитываются интегральные индексы качества вод (QI) для каждой станции на основании формулы, применяемой для расчета индекса сапробности по Пантле и Букку в модификации Сладечека (Sládeček, 1973), где вместо индексов сапробности видов-индикаторов использовались экологические валентности e_k :

$$\text{QI} = \frac{\sum_k e_k n_k}{\sum_k n_k}, \quad (3)$$

где n_k — показатель обилия вида k .

За основу классификации уровней загрязнения при анализе качества воды по предложенной методике принята “Классификация качества вод по ИЗВ” (Временные ..., 1981; Емельянова и др., 1982).

Преимущество QI перед индексом сапробности (S) заключается в том, что при определении значений экологических валентностей учитывается не только загрязнение легкоокисляемой органикой, но и токсическое загрязнение воды, характерное для исследуемых водоемов. Интегральный индекс QI более объективно отражает качество вод и экологическую обстановку конкретного водохранилища.

Кроме традиционных форм гидробиологических и биоиндикационных исследований, был применен метод графического анализа (МГА) (Разумовский, Моисеенко, 2009). МГА был многократно описан в научной литературе и в этой работе излагается только его краткое содержание (Разумовский, 2012; Разумовский, Гололобова, 2014; Разумовский и др., 2021).

МГА состоит из нескольких этапов. На первом этапе для всех идентифицированных в пробе таксонов (видового и более низкого ранга) рассчитывается их относительная численность в процентах. После этого строится исходный график или гистограмма. По оси абсцисс откладывается число идентифицированных таксонов, а по оси ординат — их относительная численность. При этом таксоны ранжируются по показателю относительной численности в сторону его уменьшения.

Были установлены три исходных классификационных типа графиков: экспоненциальный, логистический и линейный (рис. 2). Они соответствуют основным нециклическим формам зависимостей, которые возникают в экосистемах при их ответных реакциях на внешнее воздействие (Шитиков и др., 2005). Первые два типа графиков отражают, в той или иной степени, исходные, прижизненные таксономические пропорции в диатомовых комплексах. Третий тип распределения таксономических пропорций (линейный) соответствует переотложенным комплексам.

Кроме того, при анализе первичного массива данных и построении графиков, характеризующих таксономические пропорции в фитопланктонных комплексах, был использован новый методологический прием, позволивший наиболее объективно описать их таксономические пропорции при помощи МГА.

Обычно подсчет процентных пропорций в микрофлористических комплексах из поверхностных осадков проводится в конце осени, после окончания периода вегетационной активности, когда произошло отмирание клеток и их оседание на дно.

При анализе фитопланктонных комплексов была симитирована эта ситуация: все просмотренные фитопланктонные комплексы, разбивавшиеся в водной среде с весны до осени в данном пункте наблюдения, были совместно проанализированы, и абсолютная численность клеток всех

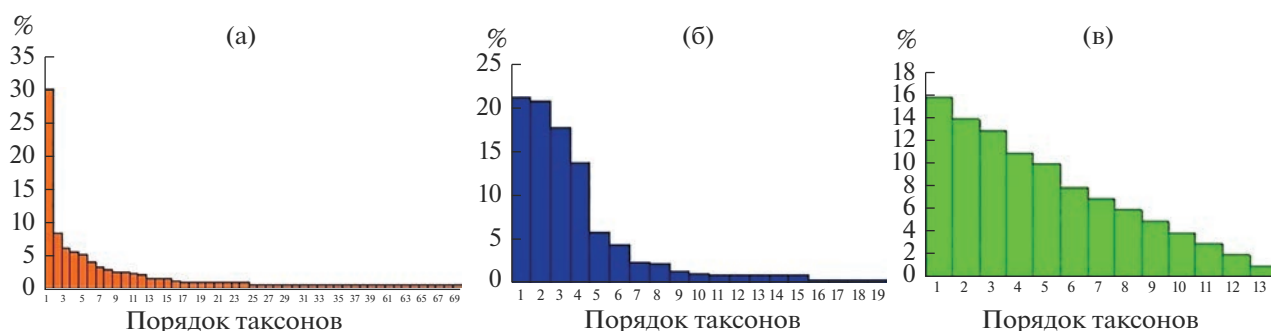


Рис. 2. Основные типы распределения таксономических пропорций (линейная размерность координат): (а) экспоненциальный, (б) логистический и (в) линейный.

идентифицированных таксонов просуммирована так же, как при их последовательном оседании на дно. В итоге для всех идентифицированных таксонов была рассчитана их относительная численность за весь период вегетационной активности в данном пункте за конкретный год (Разумовский и др., 2018). Проведенные расчеты позволили сопоставить таксономическую структуру фитопланктонных комплексов с диатомовыми комплексами из колонок ДО.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализом таксономического состава фитопланктонных комплексов 2017–2019 гг. было установлено, что наибольшая доля идентифицированных индикаторных видов сапробности (S) в Иваньковском водохранилище относится к отделу диатомовых. Было обнаружено 156 видов-индикаторов органического загрязнения. Большинство из них относятся к мезосапробам.

Констатируется ожидаемая сезонная повторяемость численных значений S. Их незначительная ежегодная вариативность определяется природно-климатическими, погодными условиями. Подавляющее большинство численных значений S не выходит за рамки β -мезосапробной зоны (рис. 3).

Полученные результаты подтверждают, что принятый при биомониторинге расчет индекса сапробности (S) обладает исходным методологическим недостатком, что приводит к нивелированию реальной сапробиологической обстановки на водохранилище (Шитиков и др., 2005).

Расчет численных значений интегрального индекса качества QI производился на основе результатов химических и биологических анализов, проведенных с мая по сентябрь в 2017–2019 гг. с прибрежных участков створов. В результате расчетов были получены экологические валентности e_k для 59 видов-индикаторов Иваньковского водохранилища, отражающие отношение каждого

из них к комплексному воздействию химических веществ.

Установлена выраженная сезонная повторяемость численных значений QI, их незначительная вариативность (рис. 4). Это определяется ежегодной повторяемостью превышений ПДК по аналогичному спектру загрязняющих веществ, поступающих в водохранилище.

В 2021–2022 гг. на протяжении всего цикла вегетационной активности в фитопланктонных комплексах Рыбинского водохранилища доминировали цианопрокариоты и диатомовые водоросли. Наибольшим таксономическим (видовым) разнообразием отличались диатомовые. Доминирующие комплексы фитопланктона характеризовались значительным числом золотистых, динофитовых, криптофитовых и зеленых водорослей. В фитопланктонных пробах Рыбинского водохранилища было идентифицировано более 200 низших таксонов (видов, вариететов и форм). Расчет индекса сапробности S с учетом унификации биоиндикационных методов (Моисеенко, Разумовский, 2009) и подсчета суммарной относительной численности видов-индикаторов (Разумовский и др., 2018) позволил установить средние численные значения S для всех точек отбора мониторинга: Коприно – 1.98; Молога – 1.87; Средний Двор – 1.77; Наволок – 1.7; Измайлово – 1.78; Брейтово – 1.9. Результаты расчетов свидетельствуют о принадлежности всего водохранилища к β -мезосапробной зоне.

Кроме того, очевидно, что более высокие показатели сапробности характерны для прибрежных районов, а более низкие – для открытой и более глубоководной части водохранилища. Полученные результаты вполне сопоставимы с данными, полученными по диатомовым комплексам из колонки ДО, отобранной в пункте Коприно в 2018 г.

Прежде чем анализировать долговременные изменения гидрохимических и гидробиологических параметров водохранилищ, было необходимо установить отсутствие процессов переотложе-

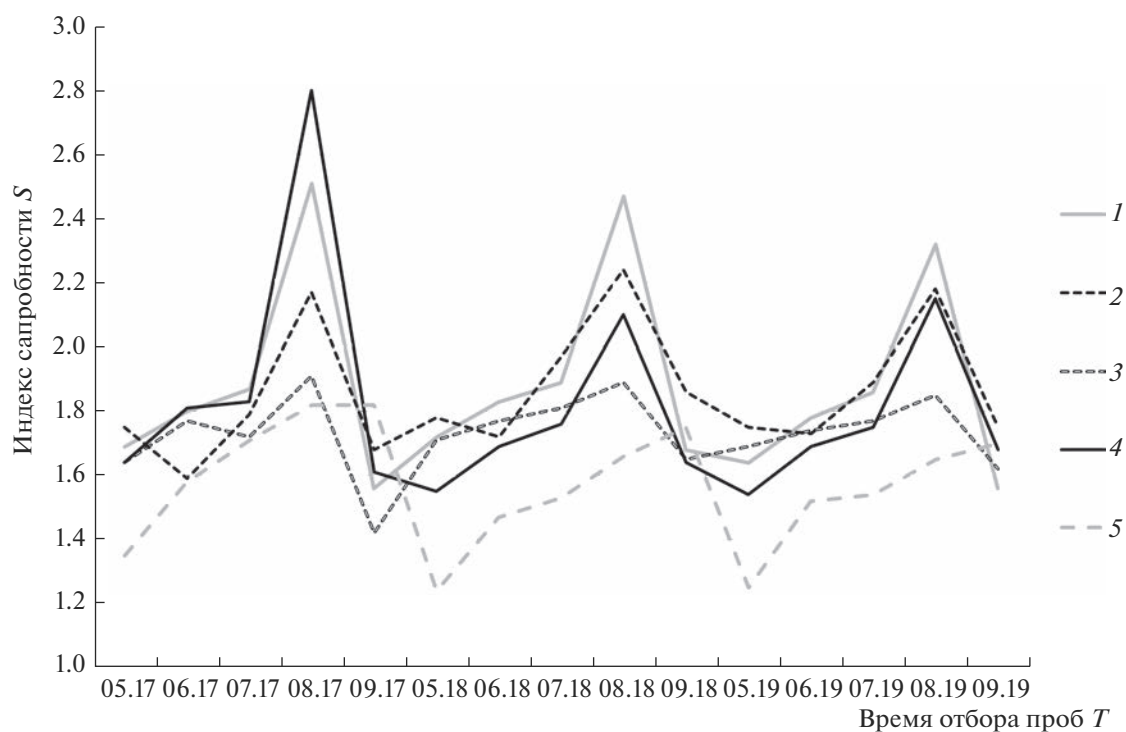


Рис. 3. Изменение численных значений индекса сапробности S в Иваньковском водохранилище в 2017–2019 гг. 1 – Шошинский плес; 2 – Верхневолжский плес; 3 – Средневожский плес (с. Городня); 4 – Средневожский плес (г. Конаково); 5 – Иваньковский плес.

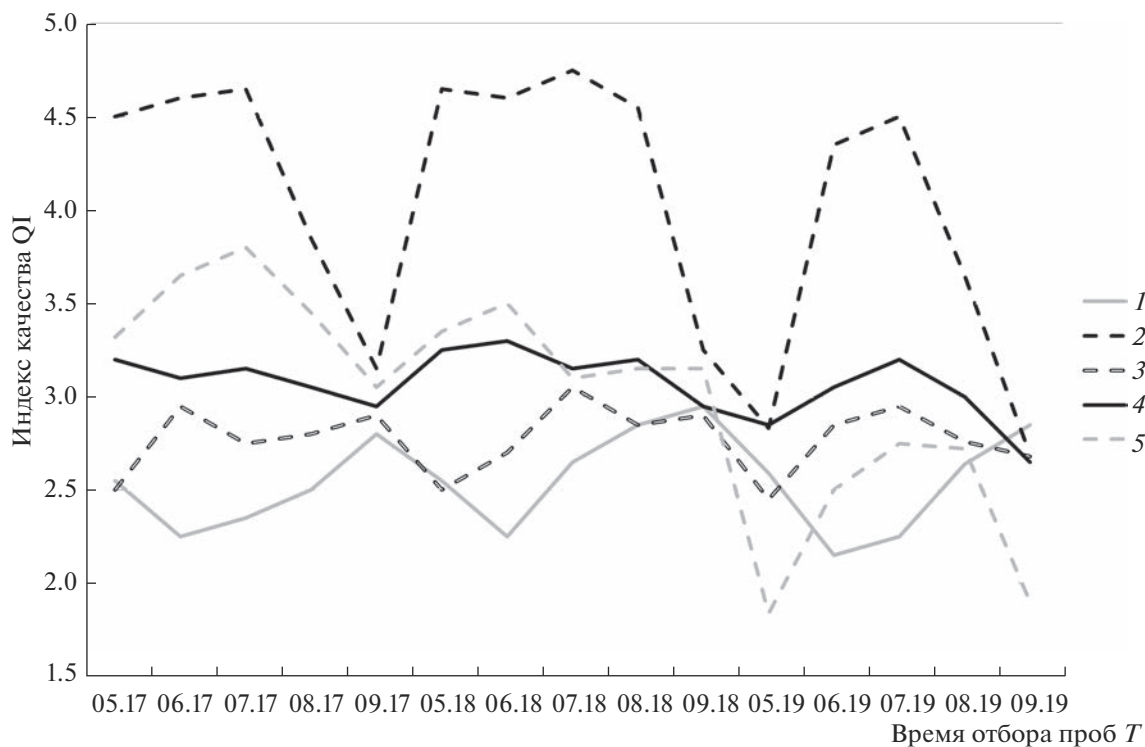


Рис. 4. Изменение численных значений интегрального индекса качества QI в Иваньковском водохранилище в 2017–2019 гг. Обозначения приведены на рис. 3.

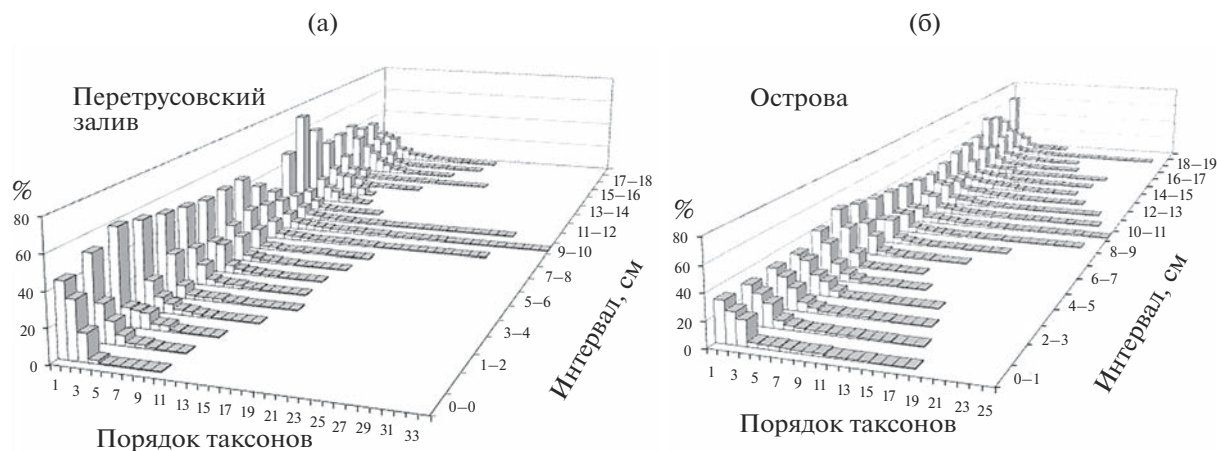


Рис. 5. Таксономическая структура диатомовых комплексов из колонок донных отложений в Иваньковском водохранилище из Перетрусовского залива (а) и из района Островов (б).

ния в сформировавшихся ДО. Если в отобранных колонках ДО были бы зафиксированы процессы переотложения, то это существенно затруднило бы восстановление непрерывности анализируемых процессов, происходящих в водоемах. Для Иваньковского водохранилища все построенные гистограммы имеют плавные пропорциональные очертания логистического, экспоненциального или смешанного (экспоненциально-логистического) типа (рис. 5а, 5б).

Таксономическая структура диатомовых комплексов была так же изучена в образцах из колонки ДО, отобранной в Рыбинском водохранилище в районе Коприно (рис. 6).

Анализ в линейной системе координат позволил также сделать вывод, что все полученные гистограммы имеют пропорциональные очертания, преимущественно экспоненциального характера распределения (см. рис. 5, 6). Ни в одном из интервалов колонки ДО выраженных процессов переотложения выявлено не было.

Это позволило провести достоверный анализ изменения концентраций тяжелых металлов и реконструкцию долговременных изменений трофического статуса водохранилища по концентрации соединения фосфора. К наиболее значимым результатам следует отнести увеличение концентрации тяжелых металлов в нижних горизонтах колонок ДО. Данная закономерность характерна для обоих обследованных водохранилищ (рис. 7).

В результате проведенных расчетов были получены численные значения S вдоль всего разреза колонки ДО отобранной в Перетрусовском заливе (Иваньковское водохранилище). Исходя из численных значений и построенной линии тренда, в заливе констатируется выраженные процессы сапробизации, что, вероятно, связано с зарас-

танием и накоплением органики в прибрежной зоне. За проанализированный промежуток времени индекс сапробности повысился с 1.575 до 1.725 (рис. 8).

В образцах из колонки ДО, отобранной в районе Островов, были также рассчитаны численные значения S . Констатированы малозначительные изменения, носящие циклический характер (см. рис. 8).

Расчет изменения численных значений QI по разрезу двух колонок ДО из Иваньковского водохранилища проводился по 16 видам-индикаторам в районе Островов и по 19 видам-индикаторам в районе Перетрусовского залива, которые были идентифицированы в диатомовых комплексах. В отличие от результатов, полученных при долговременном изменении численных значений S , при расчете численных значений QI констатируется направленное ухудшение качества вод как на открытых участках водохранилища (Острова), так и в прибрежной зоне (Перетрусовский залив) (см. рис. 8).

Ранее, при изложении методики расчета QI , было упомянуто, что она предваряется расчетами ИЗВ. Процессы изменения трофического статуса водоема могут иметь двойственную природу и зависеть от природных факторов и антропогенных воздействий. Именно поэтому долговременные изменения численных значений S существенно различаются в прибрежной зоне с низкой проточностью (Перетрусовский залив) и в открытых участках (Острова) (см. рис. 8).

Долговременное изменение численных значений QI однозначно свидетельствует о повышении антропогенной нагрузки, что оказывает негативное воздействие на все участки Иваньковского водохранилища (см. рис. 8).

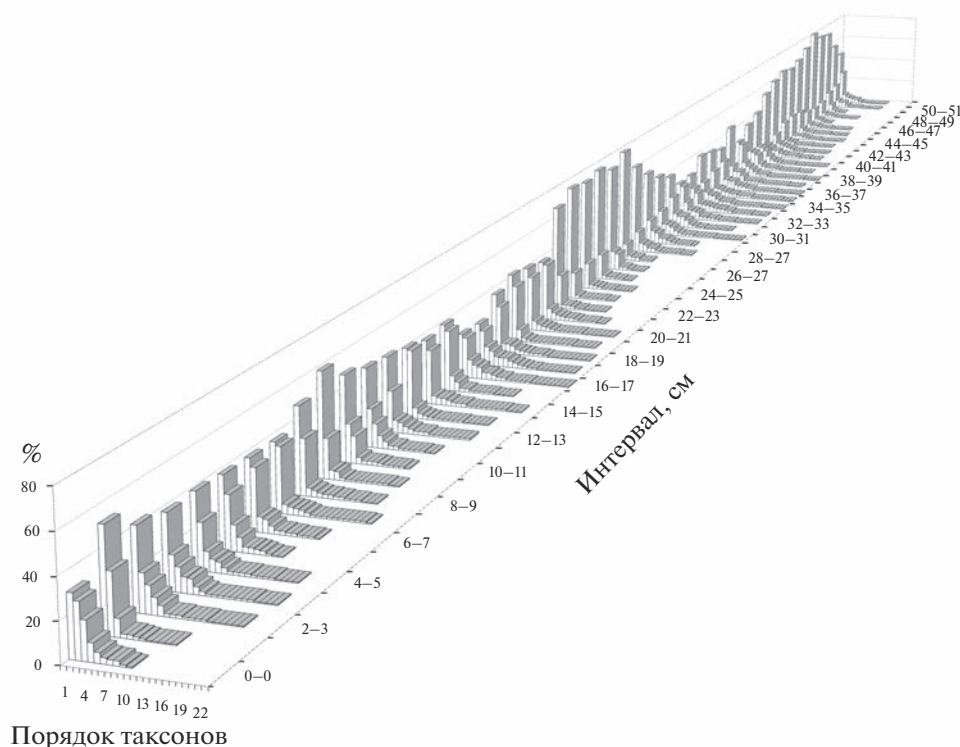


Рис. 6. Таксономическая структура диатомовых комплексов из колонки донных отложений в Рыбинском водохранилище из района Коприно.

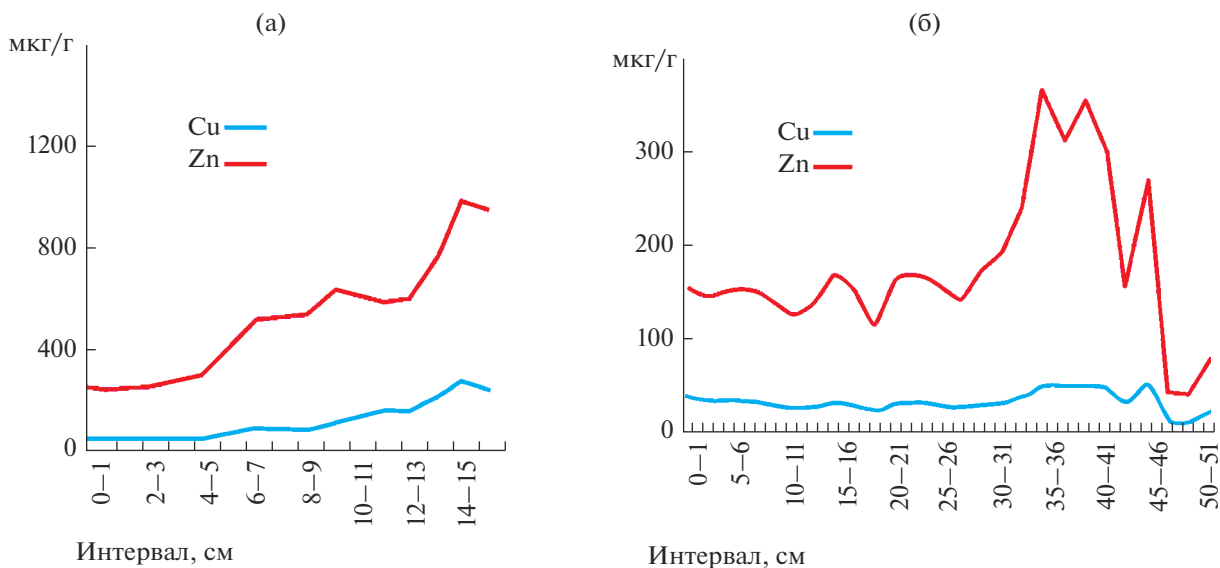


Рис. 7. Распределение тяжелых металлов (Cu и Zn) в колонках донных отложений из Ивановского (а) и Рыбинского (б) водохранилищ.

Наглядной демонстрацией применения нового метода оценки долговременных негативных изменений было проведение исследований по оценке информативности рассчитываемого ин-

декса сапробности S и интегрального индекса качества QI .

Ранее полученные результаты подтвердили, что принятый при биомониторинге расчет индекса

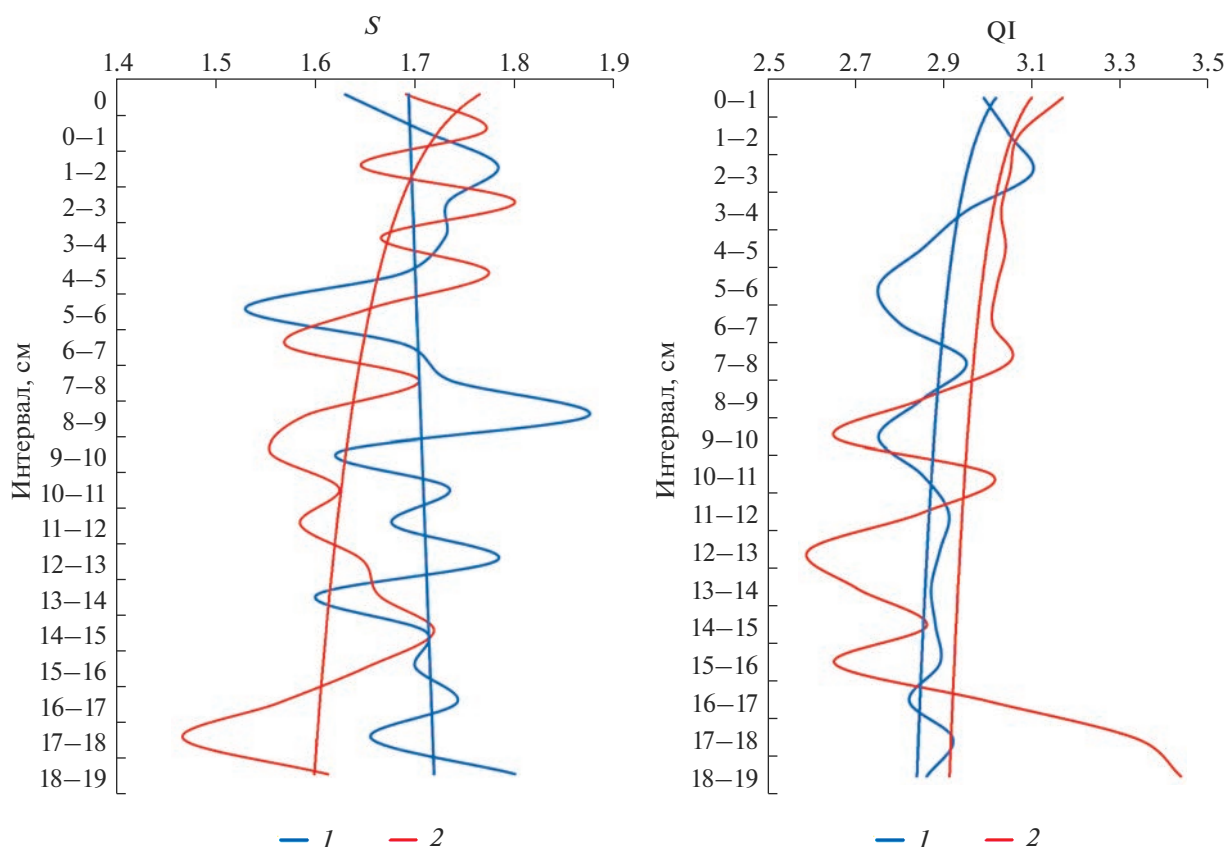


Рис. 8. Долговременные изменения численных значений S и QI в Иваньковском водохранилище. Численные значения и результирующие линии: 1 – в районе Островов, 2 – в Перетрусовском заливе.

сапробности S обладает исходным методологическим недостатком: происходит “выравнивание”, или нивелирование реальной сапробиологической обстановки в водохранилище (Шитиков и др., 2005). Численные значения интегрального индекса качества QI более информативны, но их расчет более сложен.

В 2018 г. были отобраны две колонки ДО в районе Коприно (Рыбинское водохранилище). Мощность колонок составила 52 и 54 см. При химическом анализе образцов по разрезу ДО из Рыбинского водохранилища было отмечено повышение концентрации P_2O_5 (рис. 9). Это свидетельствует об окончании периода умеренного эвтрофного статуса Рыбинского водохранилища (Минеева, 2004) и очередного периода эвтрофирования водоема (Сигарева и др., 2013; Сигарева, Тимофеева, 2018). В образцах из колонки ДО, отобранной в районе Коприно, было идентифицировано 52 вида-индикатора сапробности. Расчет долговременных изменений численных значений индекса сапробности S привел к аналогичным заключениям (см. рис. 9).

В сентябре 2022 г. была отобрана колонка ДО в Видогошинском заливе Иваньковского водохра-

нилища. Глубина в районе затопленного оз. Видогошь составляет более 19 м (см. рис. 4). Максимальная длина колонки, отобранной в центре палеозера, составила 95 см.

При осмотре образцов из колонки ДО была отмечена выраженная зона перехода осадков озерного генезиса, сформировавшихся до затопления озера в 1937 г., в осадки, накопившиеся после создания водохранилища. Общая мощность осадков, сформировавшихся с момента создания водохранилища, составляет около 55 см.

Предварительный просмотр диатомовых комплексов по всему разрезу колонки подтвердил вышеизложенные наблюдения. В верхней части колонки доминирующий комплекс представлен центрическими видами диатомовых водорослей, которые по видовому составу сходны с таксономическим составом диатомовых комплексов из колонок ДО, отобранных ранее в Перетрусовском заливе и в районе Островов. В нижней части колонки преобладают диатомовые комплексы озерного генезиса с преобладанием пеннатных форм из перифитонных комплексов со значительной долей бентосных форм.

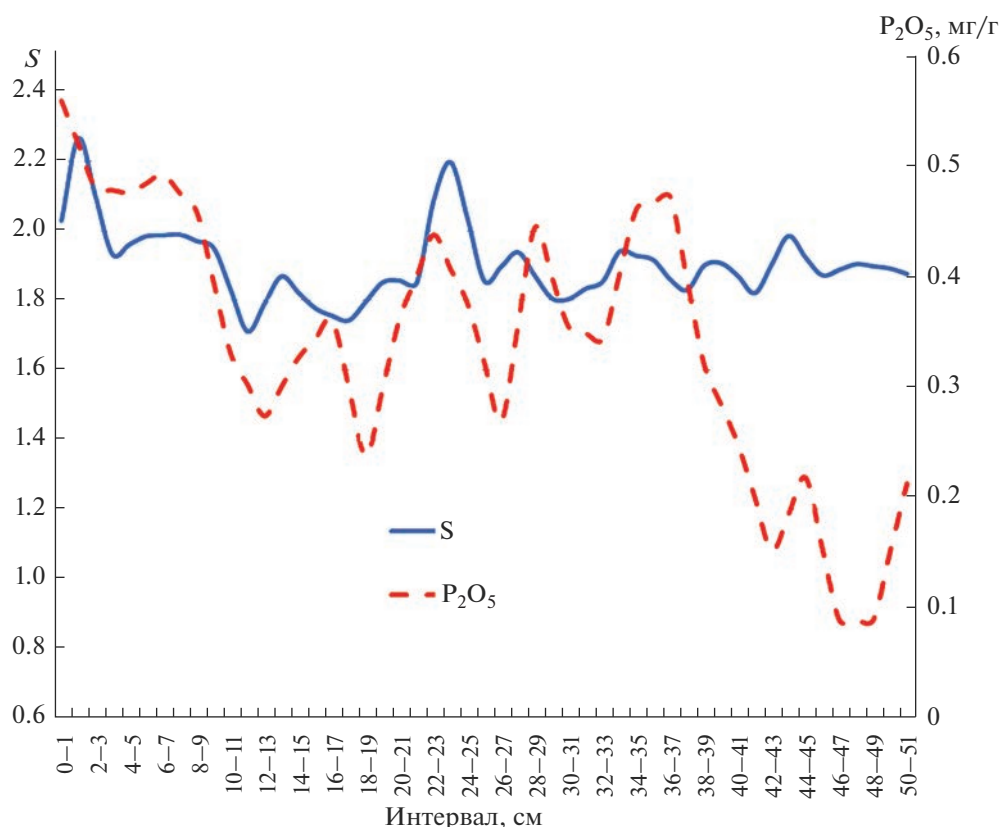


Рис. 9. Численные значения концентрации P_2O_5 и индекса сапробности S по разрезу колонки донных отложений из Рыбинского водохранилища (Коприно).

ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследовательских работ было констатировано, что две колонки ДО, отобранные в Ивановском водохранилище, не характеризуют все этапы осадконакопления. Косвенным подтверждением этого вывода является длина колонок ДО, отобранных в Рыбинском водохранилище (52–54 см).

Длина двух колонок, отобранных в Ивановском водохранилище, составляет 21 и 19 см. Разумеется, темпы седиментации в водохранилищах могут различаться, но не более чем в два раза, как в этом случае. Предположительно эти зоны седиментации сформировались за последние несколько десятилетий. Это связано с долговременным преобразованием береговых, прибрежных и островных зон, процессами абразии, эрозии и др.

Гидродинамический режим Рыбинского водохранилища в районе Коприно позволил накапливаться ДО на протяжении всего времени существования водоема. При визуальном осмотре образцов из колонки ДО было установлено, что нижние горизонты (50–54 см) сформировались в речных условиях, т.е. до создания Рыбинского

водохранилища. Полученные результаты подтверждаются гранулометрическим составом ДО и имеющимися данными об изменении магнитных параметров и процентного содержания органических веществ вдоль кернов ДО (Законнов и др., 2018; Куражковский и др., 2002). Следовательно, темпы седиментации на этом участке составляют, предположительно, около 0.7 см/год.

Уже после реализации первого этапа работ был сформулирован другой подход к поиску зон формирования ДО. Это стало возможным после обнаружения озер, затопленных после создания Рыбинского и Ивановского водохранилищ.

Очевидно, что образовавшийся рельеф дна определяет зону месторасположения реликтовых озер как зону устойчивой седиментации в сформированных водохранилищах с момента их возникновения. Более того, зона накопления ДО в условиях сформированного водохранилища может быть достоверно распознана и выделена по диатомовому анализу при сравнении с теми осадками, которые образовались в затопленных озерах до создания водохранилища. Это позволяет

получить данные о планктонной биоте и химическом составе вод на протяжении всего существования водохранилищ.

Более того, значимая составляющая диатомовых водорослей в фитопланктонных комплексах (40–60%) позволяет провести возрастную идентификацию диатомовых комплексов из ДО с теми или иными интервалами биомониторинга, который проводился на обоих водохранилищах.

Планируется комплексное изучение колонок ДО в зонах непрерывной седиментации и анализ многолетних рядов гидрохимических и гидробиологических наблюдений. В качестве объектов исследований вновь выбраны Ивановское и Рыбинское водохранилища. Это определяется длительностью их существования, мощностью накопившихся отложений, достоверным наличием палеоозер и степенью изученности.

В дальнейшем планируется решение и обратной задачи: возможность “заполнить” временной промежуток 1990-х, когда биомониторинг был прерван, и информация была потеряна. Разумеется, это возможно со значительными допущениями, поскольку такие значимые группы фитопланктона, как зеленые, сине-зеленые и другие, не сохраняются в осадке. Однако их видовой состав и численность имеют выраженную зависимость от таксономической структуры диатомовых комплексов. Если обратная задача по восстановлению непрерывности рядов наблюдений будет успешно разрешена, то станет возможной достоверная реконструкция долговременных изменений в таксономической структуре фитопланктонных комплексов с самого момента создания водохранилища, когда система биомониторинга еще не была внедрена.

ВЫВОДЫ

1. Комплексный анализ колонок ДО позволяет получить достоверную информацию о долговременных изменениях, происходящих в водохранилищах под воздействием антропогенных нагрузок и природных изменений.

2. Достоверность информации определяется тем, что расчету всех биоиндикационных параметров будет неизменно сопутствовать анализ химического состава водной среды и ДО.

3. Наибольшие затруднения при подобных исследованиях вызывает поиск зон устойчивой седиментации в водохранилищах.

4. На основе проведенных исследований возможен достоверный и обоснованный прогноз, подразумевающий анализ живых и неживых компонентов водохранилища как единой системы.

5. Предложенный метод исследований позволяет не только получить информацию об истории развития водохранилищ с момента их образования, но и реконструировать экологическую обстановку в те временные интервалы, когда мониторинг был прерван.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2022-0002 Государственного задания ИВП РАН.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the State Assignment theme no. FMWZ-2022-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 500 с.
- Временные методические рекомендации по оперативному прогнозированию загрязненности рек. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 102 с.
- Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250-1163. М., 1986. 5 с.
- Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука, 1985. 244 с.
- Диатомовый анализ. Кн. 1. Л.: Госгеолитиздат, 1949. 239 с.
- Емельянова В.П., Данилова Г.Н., Колесникова Т.Х. Обзор методов оценки качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям // Гидрохимические материалы. 1982. Т. 81. С. 121–131.
- Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы их роль в формировании донных осадков Волжско-Камского каскада // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46.
- Зеленевская Н.А. Мониторинг фитопланктона и оценка экологического состояния Саратовского водохранилища: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Тольятти, 1998. 25 с.
- Зеленевская Н.А. Фитопланктон Саратовского водохранилища в 2006–2010 годах // Вестн. Волжского ун-та им. В.Н. Татищева. 2011. № 12. С. 130–137.
- Куражковский А.Ю., Куражковская Н.А., Клайн Б.И., Законнов В.В. Стратификация горизонтов в донных осадках Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 5. С. 522–555.
- Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
- Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В. Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озе-

- рах (диатомовый анализ) // ДАН. Общая биология. 2009. Т. 427. № 1. С. 132–135.
- Разумовский Л.В. Оценка трансформации озерных экосистем методом диатомового анализа. М.: Геос, 2012. 199 с.
- Разумовский Л.В. Оценка информативности новой концепции комплексного мониторинга на примере трех водохранилищ / Сб. трудов XVII международной научной конф. диатомологов. Диатомовые водоросли: морфология, биология, систематика, флористика, экология, палеогеография, биостратиграфия (Минск, 23–28 августа 2021 г.). Минск: Колоград, 2021. С. 106–112.
- Разумовский Л.В., Гололобова М.А. Долговременные трансформации диатомовых комплексов в озерах Борое и Глубокое // Вестн. Моск. ун-та. Серия 16: Биология. 2014. № 1. С. 19–23.
- Разумовский Л.В., Корнева Л.Г., Анисимова А.В., Кушнарева Т.Н. Оценка долговременных трансформаций экосистемы Рыбинского водохранилища по фитопланктонным комплексам / Сб. трудов XVII междунар. науч. конф. диатомологов (Минск, 23–28 августа 2021 г.). Минск: Колоград, 2021. С. 113–116.
- Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // ДАН. Общая биология. 2009. Т. 429. № 3. С. 274–277.
- Разумовский Л.В., Щеголькова Н.М., Разумовский В.Л. Перспективы применения метода графического анализа таксономических пропорций при изучении фитопланктона реки Москвы // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29. № 1. С. 5–18.
- Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 320 с.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
- Сигарева Л.Е., Законнов В.В., Тимофеева Н.А., Касьянова В.В. Осадочные пигменты и скорость илонакопления как показатели трофического состояния Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 1. С. 62–69.
- Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А. Содержание растительных пигментов в донных отложениях водохранилищ Волги // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 105–114.
- Соломина О.Н., Калугин И.А., Александрин М.Ю., Бушуева И.С., Дарин А.В., Долгова Е.А., Жомелли В., Иванов М.Н., Мацковский В.В., Овчинников Д.В., Павлова И.О., Разумовский Л.В., Чепурная А.А. Бурение осадков оз. Каракель (долина р. Теберда) и перспективы реконструкции истории оледенения и климата голоцена на Кавказе // Лёд и Снег. 2013. № 2 (122). С. 102–111.
- Шутиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука, 2005. 281 с.
- Karandashev V.K., Leikin A. Yu., Khvostikov V.A., Kutseva N.K., Pirogova S.V. Water Analysis by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry // Inorganic Materials. 2016. Vol. 52. № 14. P. 1391–1404.
- Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // J. of Paleolimnology. 1990. Vol. 4. P. 87–90.
- Sládeček V. System of water quality from biological point of view // Arch. Hydrobiol. Ergeb. Limnol. 1973. Vol. 7. № 1. P. 1–218.

Long-Term Changes Reconstruction in Two Upper Volga Reservoirs Based on the Bottom Sediments Comprehensive Analysis Data

L. V. Razumovskii¹*, T. N. Kushnareva¹, V. L. Razumovskii¹, and A. V. Anisimova¹

¹Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: lazy-lion@mail.ru

The paper presents a new research program for assessing long-term transformations occurring in reservoirs. To assess the prospects of the proposed studies, the Ivankovo and Rybinsk reservoirs were selected due to their advanced age, the power of accumulated deposits, and the degree of study. The novelty of the research consisted of the joint analysis of the results of phytoplankton complexes biomonitoring and the analysis of the diatom complexes species composition from the bottom sediments columns. At the same time, the analysis of the waters and samples chemical composition from the bottom sediments columns was carried out. The absence of redeposition processes during the formation of sediments at the sampling points was confirmed by the method of taxonomic proportions graphical analysis in diatom complexes. This determines the reliability of the diatom and chemical analysis results' comparison of the bottom sediments. The results of the water quality assessment by two indexes are considered according to the monitoring data: the saprobity index S and the integral water quality index QI. The expected seasonal repeatability of the numerical values of S and QI is stated. Similar calculations were carried out for indicator species from diatom complexes in the bottom sediments columns samples. The processes of water quality deterioration according to the above-mentioned indexes are noted. As a result of the research conducted, the optimal location of bottom sediments column sam-

pling points in the Rybinsk and Ivankovo reservoirs was established. During the formation of reservoirs, the lakes located on their territory were flooded. The resulting morphometric bottom relief determined those relict lakes' locations as zones of stable sedimentation. According to the comprehensive studies results, long-term negative processes caused by anthropogenic load have been confirmed in the investigated reservoirs.

Keywords: integrated monitoring, phytoplankton, diatoms, bottom sediments

REFERENCES

- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. *Bioraznoobrazie vodoroslei – indikatorov okruzhayushchei sredy* [Biodiversity of Algae – Indicators of the Environment]. Tel Aviv, 2006. 500 p.
- Davydova N.N. *Diatomovye vodorosli – indikatory prirodnykh uslovii vodoemov v golotsene* [Diatoms Indicators of Natural Conditions of Reservoirs in the Holocene]. Leningrad: Nauka Publ., 1985. 244 p.
- Diatomovyi analiz. Kn. 1* [Diatom Analysis. Book 1]. Leningrad: Gosgeolizdat Publ., 1949. 239 p.
- Emel'yanova V.P., Danilova G.N., Kolesnikova T.X. Review of methods for assessing the quality of surface waters by hydrochemical indicators. *Gidrokhim. Materialy*, 1982, vol. 81, pp. 121–131. (In Russ.).
- Karandashev V.K., Leikin A.Yu., Khvostikov V.A., Kutseva N.K., Pirogova S.V. Water Analysis by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Inorg. Mater.*, 2016, vol. 52, no. 14, pp. 1391–1404.
- Kurazhkovskii A.Yu., Kurazhkovskaya N.A., Klain B.I., Zakonnov V.V. Stratification of Horizons in Bottom Sediments of the Rybinsk Reservoir. *Water Resour.*, 2002, vol. 29, pp. 506–509.
<https://doi.org/10.1023/A:1020317729396>
- Mineeva N.M. *Rastitel'nye pigmenty v vode volzhskikh vodozhranilishch* [Plant Pigments in the Water of the Volga Reservoirs]. Moscow: Nauka Publ., 2004. 156 p.
- Moiseenko T.I., Razumovsky L.V. A new technique for reconstructing the cation-anion balance in lakes by diatom analysis. *Dokl. Biol. Sci.*, 2009, vol. 427, pp. 325–328.
<https://doi.org/10.1134/S0012496609040061>
- Razumovsky L.V. Evaluation of the informativeness of the new concept of integrated monitoring on the example of three reservoirs. In *Diatomovye vodorosli: morfologiya, biologiya, sistematika, floristika, ekologiya, paleogeografiya, biostratigrafiya. Sbornik Tr. XVII Mezhd. Nauch. Konf. Diatomologov* [Diatoms: Morphology, Biology, Taxonomy, Floristry, Ecology, Paleogeography, Biostratigraphy. Proc. of the XVII Int. Sci. Conf. of Diatomologists]. Minsk: Kolograd Publ., 2021, pp. 106–112. (In Russ.).
- Razumovsky L.V. *Otsenka transformatsii ozernykh ekosistem metodom diatomovogo analiza* [Assessment of Transformation of Lake Ecosystems by Diatom Analysis]. Moscow: GEOS Publ., 2012. 199 p.
- Razumovsky L.V., Gololobova M.A. Long-term transformations of diatom complexes in Boree and Glubokoe lakes. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 16: Biol.*, 2014, no. 1, pp. 19–23. (In Russ.).
- Razumovsky L.V., Korneva L.G., Anisimova A.V., Kushnareva T.N. Assessment of long-term transformations of the ecosystem of the Rybinsk reservoir by phytoplankton complexes. In *Diatomovye vodorosli: morfologiya, biologiya, sistematika, floristika, ekologiya, paleogeografiya, biostratigrafiya. Sbornik trudov XVII Mezhd. Nauch. Konf. Diatomologov* [Diatoms: Morphology, Biology, Taxonomy, Floristry, Ecology, Paleogeography, Biostratigraphy. Proc. of the XVII Int. Sci. Conf. of Diatomologists]. Minsk: Kolograd Publ., 2021, pp. 113–116. (In Russ.).
- Razumovsky L.V., Moiseenko T.I. Estimation of spatiotemporal transformations of lake ecosystems by the method of diatom analysis. *Dokl. Biol. Sci.*, 2009, vol. 429, pp. 514–517.
<https://doi.org/10.1134/S0012496609060106>
- Razumovsky L.V., Shchegol'kova N.M., Razumovsky V.L. Prospects of applying the method of graphical analysis of taxonomic proportions in the study of phytoplankton of the Moscow River. *Probl. Ekol. Monitor. Modelir. Ekosist.*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 5–18. (In Russ.).
- Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores. *J. Paleolimnol.*, 1990, vol. 4, pp. 87–90.
- Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem* [Guidelines for Hydrobiological Monitoring of Freshwater Ecosystems]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1992. 320 p.
- Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi* [Guidelines for the Chemical Analysis of Land Surface Waters]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977. 541 p.
- Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. *Kolichestvennaya gidroekologiya: metody, kriterii, resheniya. Kn. 1* [Quantitative Hydroecology: Methods, Criteria, Solutions. Book 1]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 281 p.
- Sigareva L.E., Timofeeva N.A. The content of plant pigments in the bottom sediments of the Volga reservoirs. *Tr. IBVV RAN*, 2018, vol. 81, pp. 105–114. (In Russ.).
- Sigareva L.E., Zakonnov V.V., Timofeeva N.A., Kas'yanova V.V. Sediment pigments and silting rate as indicators of the trophic condition of the Rybinsk Reservoir. *Water Resour.*, 2013, vol. 40, pp. 54–60.
<https://doi.org/10.1134/S0097807813010090>
- Sládeček V. System of water quality from biological point of view. *Arch. Hydrobiol. Ergeb. Limnol.*, 1973, vol. 7, no. 1, pp. 1–218.
- Solomina O.N., Kalugin I.A., Aleksandrin M.Yu., Bushueva I.S., Darin A.V., Dolgova E.A., Zhomelli V., Ivanov M.N., Mackovsky V.V., Ovchinnikov D.V., Pav-

- Iova I.O., Razumovsky L.V., Chepurnaya A.A. Drilling of lake sediments. Karakol (Teberda River Valley) and prospects for reconstructing the history of glaciation and Holocene climate in the Caucasus. *Led i Sneg*, 2013, vol. 122, no. 2, pp. 102–111. (In Russ.).
- Vremennye metodicheskie rekomendatsii po operativnomu prognozirovaniyu zagryaznennosti rek* [Temporary Methodological Recommendations for Operational Forecasting of River Pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1981. 102 p.
- Vremennye metodicheskie ukazaniya po kompleksnoi otsenke kachestva poverkhnostnykh i morskikh vod. Utv. Goskomgidrometom SSSR 22.09.1986 g. № 250-1163* [Temporary Guidelines for a Comprehensive Assessment of the Quality of Surface and Marine Waters. Approved by Goskomgidrometom USSR in 22.09.1986. No. 250-1163]. Moscow, 1986. 5 p.
- Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G. Hydrodynamic processes and their role in the formation of bottom sediments of the Volga-Kama cascade. *Tr. IBVV RAN*, 2018, vol. 81, pp. 35–46. (In Russ.).
- Zelenevskaya N.A. Phytoplankton monitoring and assessment of the ecological state of the Saratov reservoir. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Tol'yatti, 1998. 25 p.
- Zelenevskaya N.A. Phytoplankton of the Saratov reservoir in 2006–2010. *Vestn. Volzh. Univ. Tatishcheva*, 2011, no. 12, pp. 130–137. (In Russ.).

СОДЕРЖАНИЕ И ПОТОКИ МЕТАНА В ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

© 2023 г. М. Г. Гречушникова^{a, b}, И. А. Репина^{a, c, *}, Н. Л. Фролова^{a, b}, С. А. Агафонова^{a, b},
В. А. Ломов^{a, b, c}, Д. И. Соколов^{a, b}, В. М. Степаненко^{a, b, c}, В. А. Ефимов^{a, b},
А. А. Мольков^d, И. А. Капустин^d

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

^cМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, Россия

^dИнститут прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

*e-mail: repina@ifaran.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 24.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

В статье приведены результаты измерений удельного потока метана и его содержания в воде некоторых водохранилищ Волжского каскада: Ивановском, Рыбинском, Горьковском, Куйбышевском, Волгоградском за 2017–2023 гг. Измерения удельного потока проводились методом плавучих камер, определение содержания метана в пробах — методом headspace. Выявлена пространственная и сезонная изменчивость как содержания метана, так и его эмиссии в зависимости от коэффициента водообмена, погодных условий, характера донных отложений, глубины. Большие концентрации и значения удельного потока метана наблюдаются в период стратификации; при вертикальном перемешивании значения потоков существенно уменьшаются. Максимальные значения удельного потока характерны для сильно зарастающего мелководного Шошинского плеса Ивановского водохранилища (до 334 мгС-СН₄/(м² сут)), затопленной левобережной поймы Горьковского водохранилища (до 548 мгС-СН₄/(м² сут)), где они связаны со слабой проточностью и внутриводоемными циркуляциями, а также для залива р. Чеснавы на Рыбинском водохранилище (до 1086 мгС-СН₄/(м² сут)), что связано с антропогенным загрязнением. В заливах Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ, принимающих притоки с повышенной минерализацией, возможно усиление стратификации из-за плотностного расслоения, формирование зон с дефицитом кислорода и увеличение удельного потока метана, несмотря на небольшое количество органического вещества в грунтах. На примере Горьковского водохранилища показано влияние плотины на пространственную структуру потока и содержания метана. Сравнение с обобщенными данными по удельным потокам метана с водохранилищ умеренной зоны показало, что в Волжском каскаде эти величины ниже во все месяцы периода открытой воды, кроме августа.

Ключевые слова: метан, удельный поток, водохранилище, деструкция, водообмен, цветение

DOI: 10.31857/S2587556623060080, **EDN:** FNQMWD

ВВЕДЕНИЕ

Волжский каскад водохранилищ начали возводить одним из первых в России с целью энергоснабжения Москвы и центрального округа страны. Выработка электроэнергии на ГЭС до недавнего времени считалась экологически чистым производством: посчитано, что каскад в волжском бассейне экономит 12–13 млн т. у. т. ежегодно и около 30 млн т атмосферного кислорода (РусГидро ..., 2008). Но при этом вопрос об экологической и углеродной нейтральности искусственных водоемов остается открытым. Кроме проблем загрязнения воды и донных отложений, влияния на климат окружающих территорий водохрани-

лища могут быть знаковым источником эмиссии парниковых газов, и прежде всего метана, в атмосферу (Deemer et al., 2016; Giles, 2006; Greenhouse ..., 2005; Li and Zhang, 2014; Lima et al., 2006; Louis et al., 2000, Rosentreter et al., 2021). Основными факторами, определяющими содержание метана в водоемах и его эмиссию в атмосферу, являются их термический и кислородный режим, глубина, трофический статус, особенности донных отложений (Гарькуша, Фёдоров, 2021; Deemer et al., 2016; Johnson et al., 2021; Lima et al., 2006; Louis et al., 2000).

До недавнего времени эмиссия метана из водохранилищ России изучалась фрагментарно. Российский опыт оценки выбросов парниковых

газов обобщен в (Елистратов и др., 2014). В Волжском бассейне основные работы были посвящены определению содержания метана в воде и донных отложениях. В результате изучения этапов деструкции органического вещества (ОВ) в донных отложениях (ДО), в том числе метаногенеза, были выявлены следующие зональные особенности ее распределения (Дзюбан, 1999, 2010): в грунтах северных водохранилищ Верхней Волги и Камы доминируют процессы анаэробного распада, на Нижней Волге преобладает аэробная деструкция ОВ, а на Средней Волге процессы аэробного и анаэробного распада сбалансированы. Для водохранилищ Волжского каскада характерно снижение концентрации метана в близких по физико-химическим свойствам отложениях с севера на юг (Дзюбан, 1999). Наибольшая скорость метанобразования отмечается на ряде станций Рыбинского, Горьковского и Чебоксарского водохранилищ, где в восстановленных (слой 2–5 см), богатых органическим углеродом (C_{org}) илах она достигает уровня высокотрофных озер (Dzyuban, 2004). По данным многолетних исследований газохроматографическим методом было выявлено, что в период без ледостава содержание метана в воде варьируется от 1–5 мкл/л в открытых плесах вне городов до 20–60 мкл/л в зоне влияния промышленных центров. В бытовых и хозяйственных сточных водах и в портовых акваториях содержание метана достигает 100–200 мкл/л.

Российскими учеными выполнен большой цикл исследований по образованию растворенных парниковых газов в водных объектах, результаты которых были обобщены в работах (Гарькуша, Федоров, 2021; Мартынова, 2010; Федоров и др., 2005). Из водохранилищ Волжского каскада наиболее подробно в отношении режима метана изучено Рыбинское водохранилище и его притоки. В первую очередь отметим работы А.Н. Дзюбана (2011, 2016 и др.). Им изучены процессы цикла метана и деструкции органического вещества в донных отложениях на отдельных участках Рыбинского водохранилища, а также в его притоках. Показано, что наибольшая концентрация характерна для р. Шексны в районе Череповца — 66 мкл/л, такие значения связаны скорее всего с антропогенным загрязнением р. Шексны. Здесь источник поступления метана в водную массу не только иловой метаногенез (автохтонный метан), но также хозяйственные, особенно нефтяные отходы (аллохтонный источник) (Дзюбан, 2011). В притоках Рыбинского водохранилища, испытывающих слабое или умеренное загрязнение (например, рр. Согожа, Ухра), содержание метана невелико — 13–16 мкл/л, но оно более высокое по сравнению с верхними и приплотинными участками водохранилища, что может быть объяснено активным осаждением здесь органических веществ, выносимых речными водами, к тому же, как правило, более насыщенных метаном. Это

подтверждено данными (Аверина и др., 2022) о концентрациях метана в воде, полученными в ходе зимней студенческой экспедиции кафедры гидрологии суши МГУ, посвященной оценке общего содержания метана в Рыбинском водохранилище в зимний период и расчету отдельных составляющих баланса метана.

Несмотря на достаточно большой объем проведенных исследований (см. выше), прямые измерения удельного потока метана от поверхности водохранилища в атмосферу редки и для водохранилищ вне Европейской территории РФ практически отсутствуют. В (Репина и др., 2022) приведены предварительные результаты измерений эмиссии метана из водохранилищ различных регионов России и показан значительный региональный разброс значений. Для некоторых водохранилищ Волжского каскада (Волгоградское, Куйбышевское), данные измерений удельного потока метана единичны, по Ивановскому водохранилищу опубликованы данные о межгодовой изменчивости в летний период, поскольку с 2020 г. на нем проводятся регулярные съемки сотрудниками ИвНИС ИВП РАН. На данном водохранилище сезонного регулирования стока выявлена значительная пространственно-временная неоднородность потоков метана, связанная как с синоптическими условиями и кислородным режимом, так и с особенностями осадконакопления и развития фитопланктона (Гречушникова и др., 2023).

Наиболее изученным объектом в отношении содержания и эмиссии метана является слабопроточное Можайское водохранилище: многолетние измерения показали существенную внутрисезонную и межгодовую изменчивость удельного потока метана с его поверхности (Гречушникова и др., 2017, 2019; Lomov et al., 2020): от 0.2 мгC-CH₄/(м² сут) в начале летнего сезона до 400 мгC-CH₄/(м² сут) к моменту окончания периода летней стратификации. Причем межгодовые различия потоков, полученных в один и тот же сезон в разные годы, могут достигать более 100 мгC-CH₄/(м² сут), что связано с гидрологическими и синоптическими условиями конкретного года.

Сравнение измерений, проведенных в один период года на находящихся в одной климатической зоне Можайском и Горьковском водохранилищах (Гречушникова и др., 2018), показало, что проточность водохранилища в значительной степени оказывает влияние на потоки метана и его содержание в водной толще. В высокопроточном Горьковском водохранилище, в котором практически не образуется бескислородных зон, содержание метана в воде не превышает 100 мкл/л за весь летний период 2017 г. Поток метана в атмосферу над русловыми станциями также был очень незначителен, менее 5.0 мгC-CH₄/(м² сут) при лучшей, чем в малопроточных водоемах, аэрации

Таблица 1. Морфометрические и воднобалансовые характеристики водохранилищ

Водохранилище (год/период создания)	Коэффициент водообмена, K_v , год ⁻¹	Характеристика при нормальном подпорном уровне			Приток (сток), км ³ /год
		площадь зеркала, км ²	объем, км ³	глубина средняя/ максимальная, м	
Иваньковское (1937 г.)	9.0–13.6	327	1.12	4.0/19.0	9.95
Рыбинское (1941–1947 гг.)	1.2–2.6	4580	25.4	5.6/30.0	31.4
Горьковское (1955–1957 гг.)	5.4–6.1	1591	8.82	3.7/22.0	52.6
Куйбышевское (1955–1957 гг.)	2.7–5.7	6150	58.0	8.9/40.0	241
Волгоградское (1958–1960 гг.)	7.5–8.3	3117	31.5	10.0/41.0	260

Составлено по: Вода России. Научно-популярная энциклопедия, 2021 (<http://water-ru.ru>, дата обращения 20.03.2022); (Иваньковское ..., 2000; Чистая ..., 2020).

придонных горизонтов, в то время как на Можайском водохранилище потоки могут составлять более 300 мгС-СН₄/(м² сут). Детальные исследования в приплотинном районе показали, что работа ГЭС оказывает влияние на содержание и эмиссию метана из-за разрушения стратификации и смыва вторичных отложений. Дальность распространения влияния Нижегородской ГЭС на содержание и эмиссию метана оценивается в 7 км (Гречушников и др., 2022).

Цель настоящей работы – обобщить материалы измерений сезонной и годовой изменчивости содержания и удельного потока метана из разнотипных водохранилищ Волжского каскада.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

Иваньковское водохранилище – первая ступень Волжско-Камского каскада водохранилищ, водоем сезонного регулирования, созданный одним из первых (1937 г.). Это самое мелководное из крупных водохранилищ России (табл. 1). Из-за обширного мелководного Шошинского плеса около половины всей площади данного водохранилища занимает акватория глубиной менее 2 м при нормальном подпорном уровне (НПУ). Колебания уровня воды в нем в течение года достигают 4 м (Иваньковское ..., 2000). Водные массы водохранилища кроме водоснабжения столицы также используются для охлаждения систем Коньковской ГРЭС, что сказывается на тепловом режиме водоема ниже по течению от Мошковского залива. Водохранилище относится к долинному типу и имеет довольно сложную конфигурацию (рис. 1). В водохранилище выделяются четыре плеса, морфологические особенности которых обуславливают их эколого-биологические различия (Никаноров, 1975).

Рыбинское водохранилище создано на территории бассейнов трех крупных рек – Волги, Мологи и Шексны, что предопределило его сложную морфологию. Это крупное котловинно-долинное водохранилище, являющееся основным регулятором стока Верхней Волги (осуществляет непол-

ное многолетнее регулирование, см. табл. 1). Коэффициент водообмена в разные по водности годы изменяется от 1.2 до 2.6 раз в год. Колебания уровня воды в течение года достигают 4.9 м (Литвинов, Рошупко, 2007). За счет своей формы и размеров отличается от остальных объектов исследования возможностью формирования термического бара – разделения водоема по условиям стратификации на теплоактивную и теплоинерционную области.

Горьковское водохранилище – крупное и относительно мелководное. От Рыбинска до устья р. Елнати выделяют русловую часть, где сохраняется зона выклинивания подпора, ниже до плотины Нижегородской ГЭС (120 км) расположено озеровидное расширение. Это морфологически сложное пойменно-долинное водохранилище. Регулирование стока осуществляется в недельном и сезонном масштабе с внутригодовой амплитудой уровня воды 3 м (см. табл. 1).

Куйбышевское – крупнейшее в Евразии морфологически сложное пойменно-долинное водохранилище. Осуществляет глубокое сезонное регулирование стока. В период осенне-зимней сработки уровень воды снижается на 5.0–7.8 м. В весенний период водные ресурсы Куйбышевского водохранилища используются для обеспечения специального сельскохоззяйственного и рыбохозяйственного плпуска через Волгоградский гидроузел. Средняя глубина водохранилища 8.9 м, максимальная – 40 м (см. табл. 1). Наибольшей ширины оно достигает на участке пгт Лаишево–р.п. Камское устье (до 40 км) и в Верхне-Ульяновском плесе (до 27 км). Наибольшее загрязнение поступает в водоем с территории Татарстана. К плотине Жигулевской ГЭС показатели качества воды водохранилища приходят в норму (Куйбышевское ..., 2008).

Волгоградское – морфологически простое пойменно-долинное водохранилище средней глубины, сезонного регулирования стока. Замыкает Волжско-Камский каскад водохранилищ. Волгоградское водохранилище имеет относительно постоянный уровенный режим, многолет-

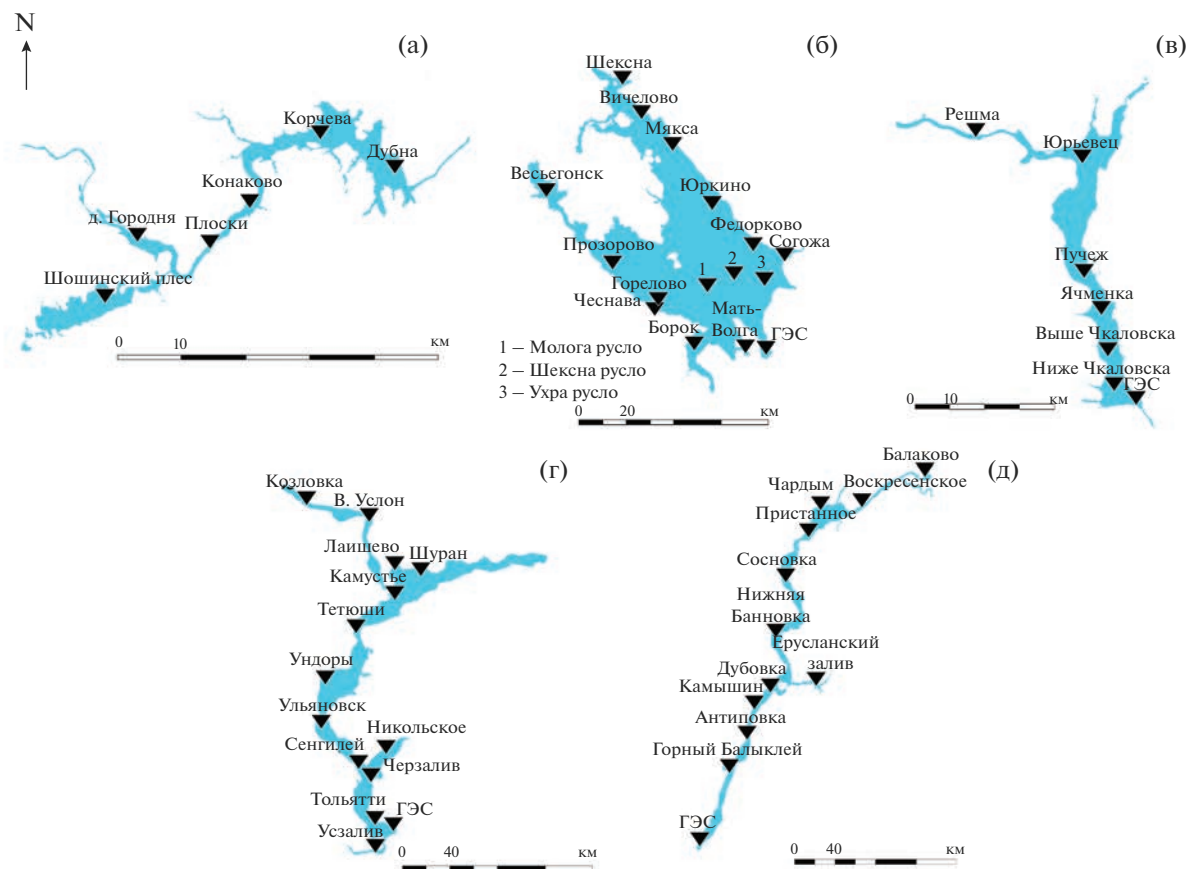


Рис. 1. Схемы положения станций отбора проб на изучаемых водохранилищах: (а) Ивановское, (б) Рыбинское, (в) Горьковское, (г) Куйбышевское, (д) Волгоградское.

ная величина колебаний уровня достигает 3.6 м^1 . Водохранилище осуществляет сезонное, недельное и суточное регулирование стока. Гидрографическая сеть в бассейне водохранилища развита слабо, суммарный расход боковых притоков составляет менее 1% от общего поверхностного притока. На участке Камышин–Волжская ГЭС постоянно отмечается повышенное содержание органических веществ, нефтепродуктов.

В годовом термическом цикле исследуемых водохранилищ выделяется зимний период с наличием ледостава, периоды весенней и осенней конвекции, период летнего нагревания и летне-осеннего охлаждения. Наибольшая продолжительность ледостава существует на Рыбинском водохранилище (158 сут) (Гидрометеорологический ..., 1975). На проточных и мелководных участках температура воды и другие характеристики распределены более однородно. Весенний период нагревания приходится на период наполнения водохранилищ. В Ивановском водохранилище при значительном транзите во вторую

фазу половодья может сформироваться горизонтальная неоднородность при равномерном распределении характеристик на вертикали. В Горьковском водохранилище в мае более теплые воды Немды и Унжи вытесняют холодную водную массу. Объем Рыбинского водохранилища превышает объем притока, поэтому в нем возникает неоднородное распределение характеристик. На спаде половодья здесь начинается термическое расслоение. В наибольшей степени оно выражено в озеровидных участках. Ветровое перемешивание способствует поступлению тепла в придонные слои. Понижение температуры начинается в августе, роль конвективных процессов усиливается в сентябре.

Для водохранилищ Верхней Волги сезонного регулирования стока наличие стратификации характерно преимущественно в первую половину лета, к августу температура по вертикали выравнивается. Но особенности синоптических условий каждого конкретного года в значительной степени обуславливают различия гидрологического режима водохранилищ. Так, например, в июле 2020 г. при дождливой и прохладной погоде наблюдалась слабая стратификация, малая мине-

¹ Вода России. Научно-популярная энциклопедия. 2021. <http://water-rf.ru> (дата обращения 20.03.2022).

рализация и благоприятный кислородный режим в Иваньковском водохранилище, а продолжительная жаркая погода летом 2022 г. привела к образованию в нем бескислородной зоны до горизонтов 9–10 м (Гречушникова и др., 2023).

На Куйбышевском водохранилище максимальная среднемесячная температура воды в поверхностном слое наблюдается в июле (до 21.8°C в Приплотинном плесе). Период ледостава составляет в среднем 145 дней. Наиболее интенсивные термические процессы протекают в верхней части водохранилища. Ветровое волнение способно вызвать полное перемешивание водных масс и выравнивание температуры по глубине, кроме наиболее глубокой приплотинной части водохранилища. На приплотинном участке в его глубоководной зоне образуется слой температурного скачка с градиентом до 8.0°–11.0°C при температуре воды на поверхности 24.0°–31.0°C (Куйбышевское ..., 2008).

Газовый режим Волгоградского водохранилища благоприятен для гидробионтов, концентрация растворенного кислорода составляет 5.5–17.4 мг/л (58–123% насыщения) (Лазарева и др., 2018; Шашуловский, Мосияш, 2010), несмотря на снижение скорости стокового течения от верховьев к плотине.

При выраженных межгодовых флуктуациях, которые зависят от синоптических условий, средние значения концентрации хлорофилла *a* характеризуют Иваньковское водохранилище как эвтрофное, Волгоградское – как мезотрофное. Трофический статус Рыбинского, Горьковского и Куйбышевского водохранилищ меняется от мезотрофного до умеренно эвтрофного и эвтрофного. Изолированные от проточного русла участки акватории во всех водохранилищах характеризуются как эвтрофные (например, Шошинский, Черемшанский заливы) (Минеева и др., 2020).

Следует отметить, что для Горьковского, Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ большое распространение получили обвальнопользовательские процессы, что, несомненно, повлияло на состав и формирование донного комплекса. По данным исследований ИБВВ РАН (Законнов, 2016), основным источником поступления наносов в волжские водохранилища является береговая абразия и эрозия ложа: до 87% в Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах. Толщина слоя илов постепенно увеличивается от водохранилищ Верхней Волги к Средней и Нижней, что связано с составом пород и ландшафтами водосборов. Волгоградское водохранилище является классическим примером в системе крупных равнинных водохранилищ, когда в речном верхнем участке наблюдается уменьшение толщины и объема илов, затем повышение в среднем районе, и понижение в приплотинном районе. Открытые глубоководные заливы на Горьковском (Унжи и Немды), Куйбышевском (Черемшанский) и Вол-

гоградском (Ерусланский) водохранилищах перехватывают часть твердого стока притоков и уменьшают толщину слоя илов по затопленному руслу Волги. Среднегодовое илонакопление уменьшается от северных водохранилищ бассейна Волги к южным.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения пространственно-временной изменчивости содержания и удельных потоков метана на водоемах в различные сезоны (в том числе во время ледостава) выполнялись съемки на опорных станциях (см. рис. 1). Станции назначались таким образом, чтобы наиболее полно охватить различные морфологические участки (районы) водохранилищ, а также мелководья и крупные заливы. Производились измерения вертикального распределения температуры воды, растворенного кислорода, электропроводности (зонды YSI ProOdo и Pro30 с точностью 0.2°C, 0.1 мг/л, 1 мкСм/см соответственно, зонд YSI Echo 2.0 с точностью 0.01°C, 0.1 мг/л, 1 мкСм/см соответственно).

Удельный поток метана в атмосферу определялся с лодки методом плавучих камер (Bastviken et al., 2011). Суть метода заключается в постановке на поверхность воды герметичных пластиковых камер с поплавками (время экспозиции, как правило, не более 1 часа, площадь основания камер 0.065–0.083 м², объем – 0.006–0.009 м³). В склянки, заполненные насыщенным раствором NaCl, шприцом отбирается воздух из камеры в начале и в конце времени экспозиции. Раствор поваренной соли необходим, чтобы исключить возможность растворения метана в воде, а также для ингибирования микробиологической деятельности. Значения удельного потока метана определялось по разности концентрации метана в камере в начале и в конце эксперимента. Определение концентрации метана в пробах воды производилось методом headspace (Bastviken et al., 2010). Пробы воды отбирались с поверхности, у дна, выше и ниже слоя температурного скачка при его наличии. Содержание метана в отобранных пробах определялось на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2.

Отбор проб донных отложений производили дночерпателем Экмана–Бэрда, анализ производился для верхнего слоя грунта толщиной не более 10 см. Определение содержания органического вещества в донных отложениях водохранилищ производили методом потерь веса при прокаливании (ГОСТ 23740–2016).

На каждой станции производились измерения метеопараметров (скорости ветра, температуры воздуха, атмосферного давления) с использованием портативной метеостанции Kestrel. Сроки

экспедиций, проведенных авторами, приведены в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В Ивановском водохранилище в периоды проведения съемок в августе 2020 и 2021 гг. содержание растворенного кислорода снижалось до величин менее 2 мг/л только в придонных горизонтах наиболее глубоководных станций, а в жарком 2022 г. зона с дефицитом кислорода достигала горизонтов 9–10 м от поверхности воды при глубинах на станциях измерений 14.0–15.5 и 7.0–8.0 м от поверхности при глубинах на станциях 9.0–11.0 м. Устойчивый антициклон в июле 2022 г. привел к значительному прогреву водной массы водохранилища (температура придонного слоя воды у плотины достигала 21.2°C) и формирования устойчивого слоя температурного скачка по всему водоему с максимальными градиентами температуры воды на станциях 1.0–3.7°C/м. В зимние периоды измерения отсутствовали. Весной в мае 2022 г. наблюдалось равномерное распределение температуры и растворенного кислорода по вертикали на всем протяжении водоема.

На Рыбинском водохранилище первая съемка с измерениями содержания и удельных потоков метана была проведена осенью 2021 г. В это время было зафиксировано охлаждение водоема при полной гомотермии (средняя температура около 13.5°C). Для зимнего и весеннего периодов 2022 г. во время ледостава на Рыбинском водохранилище наблюдается выраженная обратная температурная стратификация (около 0°C в подледном горизонте, 2.0°–3.0°C у дна). Лето характеризуется либо слабой прямой стратификацией, либо перемешанной однородной водной толщей. Высоких температурных градиентов в водоеме не наблюдается из-за активного ветроволнового перемешивания, связанного с котловинной формой чаши водохранилища и большой длиной разгона ветра. На большей части акватории вода Рыбинского водохранилища хорошо аэрирована (более 90% насыщения). Пониженное содержание кислорода в воде может наблюдаться при ледоставе в районе затопленных русел Мологи и Шексны. Аноксия (менее 1.0 мг/л) была зафиксирована в летний период в придонных горизонтах наиболее глубоких участков приплотинных плесов Волги и Шексны, а также в районе Восьегонска над затопленным руслом Мологи.

В Горьковском водохранилище в периоды проведения исследований выраженная стратификация отсутствовала: в период открытой воды температура воды убывала ко дну без значительных скачков, наибольшая разность в поверхностном и придонном горизонте достигала нескольких градусов на самых глубоких вертикалях. В жаркую погоду формировался синоптический слой скачка со вспышками цветения и увеличе-

ния содержания кислорода в верхнем приповерхностном слое до 13.0 и более мг/л. Абсолютные значения температуры воды зависели от погодных условий. Распределение растворенного кислорода имело схожие особенности, понижение его содержания до 2.0 мг/л и менее наблюдалось только в метровом придонном слое. Над затопленным руслом убывание его содержания было выражено менее, чем над затопленной поймой.

На Куйбышевском водохранилище в период проведения зимних съемок температура воды составляла 0.1°C и практически не менялась с глубиной. На станции Черзалив (в Черемшанском заливе) отмечено повышение температуры воды в придонном горизонте до 1.2°–1.9°C. Насыщение кислородом в поверхностном слое составляло преимущественно более 90%, в придонных горизонтах – снижалось до 56% в феврале 2022 г. и до 33% в феврале 2023 г. По данным съемок в период открытой воды стратификация отсутствовала, слой температурного скачка зафиксирован в августе 2021 и 2022 гг. только на станции в Черемшанском заливе. В мае 2022 г. концентрации растворенного кислорода в воде составляли 8.0–9.6 мг/л на участке от Козловки до Сенгилея и 9.0–11.4 мг/л в нижней части водохранилища. В августе 2022 г. содержание растворенного кислорода менялось и по акватории водохранилища, и по глубине (от 0.3 до 17.1 мг/л). В Усинском и Черемшанском заливах концентрации в придонном слое составили 0.9 и 0.3 мг/л соответственно.

Волгоградское водохранилище преимущественно заполнено однородной по составу основной водной массой, часто полностью перемешанной по вертикали в условиях транзитного течения, ветрового перемешивания или осенней конвективно-динамической циркуляции. Водная толща преимущественно близка к 100% насыщению кислородом, при незначительном снижении от 94–99% у поверхности до 93–97% у дна. В зимний период температура воды основной водной массы составляла 0.0°–0.3°C, в заливах наблюдалась обратная стратификация с температурой у дна 0.6°–3.2°C. Содержание кислорода в основной водной массе водохранилища составляло 90–102% насыщения, в придонных горизонтах заливов снижалось до 27–50%.

В ходе проведенных съемок получены данные о распределении органического вещества в составе донных отложений русловой ложбины и некоторых пойменных участков исследуемых водохранилищ (табл. 3), которые согласуются с данными предшествующих измерений, выполненных ИБВВ РАН (Законнов, 2016).

В Ивановском водохранилище в верховьях преобладает песчаный грунт или заиленный песок с минимальным содержанием ОВ, в средней части содержание ОВ составляет 14–16%; в приплотинном районе и Шошинском плесе 10–17 и 11–18% соответственно.

Таблица 2. Результаты натурных измерений удельного потока и содержания метана в водохранилищах

Водохранилище	Дата съемки (количество станций)	Содержание метана в воде (поверхность/дно), мкл/л		Удельный поток метана, мгС-СН ₄ /(м ² сут)	
		основная акватория	отдельные участки	интервал величин с основной акватории	наибольшее значение с отдельных участков
Иваньковское	5–6.08.2020 (5)	$\frac{1.9-17}{8-17}$		2.9–63.4	—
	4–5.08.2021 (5)	$\frac{5.0-14}{4.6-132}$		10.5–224	334 (ст. Шошинский плес)
	21–22.05.2022 (6)	$\frac{2.3-10}{3.4-14}$		3.5–11.2	—
	4–5.08.2022 (6)	$\frac{2.3-14}{73-89}$	$\frac{9.2-11}{435-1000}$ (участок Плоски–Корчева)	2.1–23.4	182 (ст. Шошинский плес)
Рыбинское	12–16.09.2021 (14)	$\frac{1.7-17}{1.2-11}$	67/— (ст. Шексна)	2.4–13.4	30.8–36.2 (верхний бьеф)
	27.01–5.02.2022 (26)	$\frac{0.2-11}{0.3-10}$		—	—
	31.03–3.04.2022 (11)	$\frac{3.4-82}{1.3-28}$		—	—
	7–12.08.2022 (20)	$\frac{1.4-9.9}{1.3-60}$	21/22 (ст. Чеснава) 2.7/404 (ст. Мать-Волга)	5.7–315	1013–1086 (ст. Чеснава)
	27.01–1.02.2023 (17)	$\frac{0.3-49}{0.3-286}$		—	—
Горьковское	27.04.2017 (5)	$\frac{1.6-2.7}{1.6-2.7}$		—	—
	13–15.08.2017 (7)	$\frac{3.5-6.9}{3.6-13}$		5.1–38.6	
	20.01.2018 (5)	1.0–4.3		—	—
	31.03.2018 (5)	0.1–1.5		—	—
	08.06.2018 (3)	$\frac{2.4-3.0}{2.9-5.0}$		2.5	
	9–10.08.2018 (8)	$\frac{2.3-6.0}{1.8-18}$		0.1–5.8	
	08.08.2019 (5)	$\frac{3.0-7.1}{1.9-14}$		0.9–9.4	6.8–16.6 (левобережная пойма в 5 км выше ГЭС)
	26–27.05.2022 (3)	$\frac{1.5-3.7}{1.3-3.7}$		0.1–4.5	
	24–25.08.2022 (8)	$\frac{0.2-0.9}{0.2-18}$	0.4/62 (левобережная пойма в 5 км выше ГЭС)	0.1–25.0	263–548 (левобережная пойма в 5 км выше ГЭС)

Таблица 2. Окончание

Водохранилище	Дата съемки (количество станций)	Содержание метана в воде (поверхность/дно), мкл/л		Удельный поток метана, мгС-СН ₄ /(м ² сут)	
		основная акватория	отдельные участки	интервал величин с основной акватории	наибольшее значение с отдельных участков
Куйбышевское	16–19.08.2021 (10)	$\frac{0.6-16}{1.6-18}$	16/5090 (ст. Черзалив)	1.1–53.5	87.3–236 (ст. Черзалив)
	15–18.02.2022 (12)	$\frac{0.6-4.8}{0.7-4.6}$	67/83 (ст. Черзалив)	—	—
	17–20.05.2022 (13)	$\frac{1.0-3.9}{1.3-3.3}$	$\frac{6.1-11}{4.9-28}$ (ст. Ульяновск, Черзалив)	1.2–11.2	30.6–49.4 (ст. Уззалив, Черзалив)
	16–19.08.2022 (14)	$\frac{2.3-9.9}{3.1-13}$	$\frac{13-44}{110-3060}$ (ст. Ульяновск, Черзалив)	2.5–42.3	228–488 (ст. Ульяновск, Черзалив)
	14–17.02.2023 (13)	$\frac{0.5-8.3}{0.5-5.2}$	133/1.1 (ст. Черзалив)	—	—
Волгоградское	09–20.09.2021 (17)	$\frac{2.0-7.7}{2.5-6.8}$	$\frac{17-42}{3.8-33}$ (заливы Камышинский и Горный Балыклей)	0.5–29.2	40.3–58.2 (Камышинский залив)
	24.02–4.03.2022 (11)	$\frac{1.5-3.6}{1.5-4.4}$	$\frac{4.9-6.4}{3.6-8.3}$ (заливы Камышинский и Ерусланский)	—	—
	13–3.11.2022 (13)	$\frac{0.6-2.1}{0.6-2.1}$	3.8/3.9 (залив Горный Балыклей)	0.6–9.7	—

Из обследованных авторами станций на Рыбинском водохранилище наибольшее содержание ОВ отмечается в районе монумента “Мать-Волга” и в устье р. Согожа (возможные причины: наличие рыбоконсервного завода и птицефабрики, слабое перемешивание вод в устье за автомобильным мостом). Из-за загрязнения при наличии подпора в устье реки создаются предпосылки к эвтрофированию и аккумуляции органогенных илов. Высокое содержание органических веществ отмечается в районе Череповца (станция Шексна, см. рис. 1), в затопленных руслах рек, где нет такого интенсивного перемешивания водной толщи, как на затопленной пойме, что способствует аккумуляции ОВ. Для Рыбинского водохранилища характерны неравномерное распределение типов донных отложений и вариация содержания ОВ в пределах 2–39%.

В Горьковском водохранилище комплекс измерений проводился авторами преимущественно в озерной части, а грунтовая съемка на участке ниже Чкаловска. Выявлена пространственная неоднородность распределения ДО: из-за влияния

ГЭС, выражающегося в трансформации поля течений возле плотины, на расстоянии нескольких километров вторичные отложения не накапливаются из-за взмучивания и смыва течениями (Гречушникова и др., 2022). На удалении от плотины порядка 7 км в русловой ложбине преобладает коричневый или оливковый ил с содержанием ОВ 10–17%, а левобережная пойма (в 5 км выше ГЭС) отличается большим содержанием ОВ (17–23%) и более темным оттенком ила, вплоть до черных включений, свидетельствующих о периодической аноксии.

Содержание ОВ в ДО Куйбышевского водохранилища менее изменчиво, чем в Рыбинском. По данным отбора проб оно максимально на станции Камустье, относительно равномерно по длине (8–10%) и минимально на станции Черзалив (2–7%).

В Волгоградском водохранилище содержание ОВ в илах русловой ложбины снижается от 13 (Чардым) до 7% (Дубовка).

Как будет показано далее, содержание ОВ в грунте оказывает влияние на величину потока ме-

Таблица 3. Массовая доля органического вещества в донных отложениях водохранилищ

Станция пробоотбора	Органическое вещество, %	Описание донных отложений
Иваньковское водохранилище		
Городня	0.3	Песок
Шошинский плес	11–18	Серый, однородный, с черными включениями, тонкодисперсный ил
Плоски	16	Светло-коричневый, рыхлый, тонкодисперсный ил
Конаково	15–16	Светло-коричневый, рыхлый, тонкодисперсный ил
Корчева	14–15	Серый, однородный, рыхлый, тонкодисперсный ил
Дубна	10–17	Светло-коричневый, однородный, плотный, тонкодисперсный ил
Рыбинское водохранилище		
Весьегонск	26	Тонкодисперсный серый ил
р. Шексна	19–28	Коричневый плотный ил с вкраплениями песка
ГЭС	19–21	Тонкодисперсный серый ил
Устье р. Согожа	34	Торфянистый ил
Мать-Волга	7–39	Красновато-коричневый ил с вкраплениями песка
Борок	15	Однородный кофейно-коричневый ил
Горелово	2	Светло-коричневый опесчаненный ил
Чеснава	8	Нет данных
Прозорово	8	Песок
Ухра (русло/пойма)	14–23/0.5	Оливковый комковатый ил, остатки моллюсков
Молога (русло/пойма)	25/5	Светло-коричневый опесчаненный ил/светло-коричневый песок
Федорково	0.5	Желтый песок
Горьковское водохранилище		
Приплотинный район (около 7 км от ГЭС)	2–9	Плотный заиленный песок, с удалением от плотины появляется тонкий светло-коричневый наил
Русло вдоль правого берега (до Чкаловска)	10–17	Светло-коричневый или серый ил, черные включения внизу колонки, сверху наил (1–3 мм)
Левобережная пойма приплотинного района	17–23	Оливковый тонкодисперсный ил с мелкими остатками растительности
Куйбышевское водохранилище		
Камское устье	12–15	Черный ил, с железистым запахом
Лаишево	9	Черный ил
Шуран	9	Коричневый ил с моллюсками
Ундоры	6–14	Черный ил
Ульяновск	8	Оливковый ил
Сенгилей	8	Коричневый ил с моллюсками
Усинский залив	15	Черный ил
Тольятти	8	Черный ил
Черемшанский залив	2–7	Ил с остатками водорослей, в августе 2023 г. коричневая супесь
Волгоградское водохранилище		
Чардым	13	Песчанистый ил с множеством раковин моллюсков и примесью гравия
Сосновка	8	Тонкодисперсный ил, встречаются раковины моллюсков
Нижняя Банновка	11	Тонкодисперсный ил, встречаются раковины моллюсков
Дубовка	7	Темный (местами черный) тонкодисперсный ил, встречаются раковины моллюсков

тана в конкретном районе, но данный фактор является не единственным, его определяющим.

В табл. 2 приведены данные измерений содержания и удельного потока метана, повышенные значения с указанием станций выделены в отдельных столбцах. Наименьшие значения содержания метана и удельного потока выявлены в Волгоградском и Горьковском водохранилищах (до 20 мкл/л в придонном горизонте и до 38.6 мгС-СН₄/(м² сут) в основной части акватории). В последнем повышенные значения удельного потока выявлены локально над левобережной поймой, характеризующейся образованием застойных зон, в то время как вдоль затопленного русла наблюдается стоковое течение, препятствующее формированию стратификации. В Волгоградском водохранилище повышенное содержание метана выявлено в Камышинском заливе. Причиной этого может быть антропогенное загрязнение, связанное с поступлением загрязненных вод г. Камышина в залив.

Наиболее высокие концентрации метана (до 3–5 тыс. мкл/л у дна) определены в Куйбышевском водохранилище в летний период. Они приурочены к пойме Ульяновского плеса (станция Ульяновск) и Черемшанскому заливу (станция Черзалив). В данном водохранилище, также как и на Горьковском водохранилище, в поперечных створах наблюдаются различные условия для эмиссии метана, что связано с особенностями циркуляции, стокового течения и стратификации водной толщи. Наибольший удельный поток метана во все сезоны измерений определен в районе ст. Черзалив. При общей глубине 16 м в августе 2021 и 2022 гг. до горизонта 9–10 м от поверхности на этой станции наблюдалась аноксия. Причина развития аноксии состоит в плотностном расслоении, поскольку р. Большой Черемшан приносит в залив более минерализованные воды (в августе 2022 г. 755 мкСм/см), и в устьевой части залива по вертикали наблюдается неоднородное распределение минерализации воды с увеличением ее к придонным горизонтам на 40–90 мкСм/см летом и на 120–160 мкСм/см зимой. В весенний период после половодья и конвективного перемешивания различия отсутствуют.

Иваньковское водохранилище отличается наибольшей проточностью среди исследуемых водоемов. Водобмен в нем происходит примерно один раз в месяц (см. табл. 1). Однако на формирование его гидрологической структуры и газового режима значительное влияние оказывают синоптические условия и водность сезона. В 2020 г. температура на съемке не превышала 22°C, в 2021 – 26.8°C, в 2022 г. достигала 29.9°C. Приток за предшествующий съемке месяц (июль) составил 1315.8, 242.3 и 291.95 млн м³ соответственно. В жарком 2022 г. при уровне воды на 0.5 м ниже предыдущих двух лет содержание метана в придонных горизонтах было на порядок больше, чем в 2020–2021 гг. Оно

не достигало таких больших значений, как в Куйбышевском водохранилище, наиболее высокое содержание (444–1000 мкл/л) отмечалось на участке Плоски–Корчева. По материалам комплексных съемок НИС Конаково ИВП РАН (Гречушникова и др., 2023), увеличение выхода метана из ДО могло быть связано не только с наибольшим прогревом донных отложений, но и с активизацией биотурбации, вызванной бескислородными условиями, сформировавшимися летом 2022 г. На недостаток растворенного кислорода в воде олигохеты реагируют более активными “дыхательными” движениями и увеличением части тела, участвующей в этих движениях, что способствует биологическому перемешиванию субстрата. Результатом биотурбации является изменение структуры донных отложений и их метаболизма, перенос растворенного кислорода, метана. Интенсивное развитие фитопланктона (на участке Плоски–Корчева численность фитопланктона достигала 111.668–302.790 млн кл/л по данным анализа проб с поверхности воды) стало причиной пересыщения воды кислородом: содержание кислорода в поверхностном слое достигало 11.3–17.6 мг/л в 2022 против 9.0–10.7 мг/л в 2021 г. Интенсивное развитие фитопланктона (цветение воды), привело к пересыщению водной массы кислородом, что активизировало процессы окисления метана и в результате снизило значения его удельного потока, особенно в нижней более глубоководной части водохранилища в районе урочища Корчева (с 224 до 23.0 мгС-СН₄/(м² сут) в 2021 и 2022 гг. соответственно). Поэтому высокие значения удельного потока (182 мгС-СН₄/(м² сут)) сохранились только в мелководном Шошинском плесе (см. табл. 3).

Соответствие наибольших значений потока метана характеру грунта прослеживается не во всех случаях. В прохладном 2020 г. наибольший поток метана был выявлен на верхнем участке Иваньковского водохранилища на станции Городня, где донные отложения представлены заиленным песком, в то время как на более глубоких станциях с илистым грунтом, содержащим больше ОВ, поток метана в атмосферу был незначителен, что было обусловлено хорошей аэрацией и окислением метана. Как показано выше, даже значительный выход метана из ДО при наличии бескислородных условий у дна, в условиях бурного цветения поверхностных горизонтов воды из-за окисления нивелируется, и поток метана значительно снижается.

В Рыбинском водохранилище в осенний период 2021 г. удельные потоки метана оказались ниже, чем в летний 2022 г. Повышенные значения удельного потока метана летом выявлены в приустьевых заливах притоков с заболоченными водосборами (более 1000 мгС-СН₄/(м² сут)), а также в приплотинной глубокой зоне (120–

Таблица 4. Удельный поток метана из водохранилищ умеренной зоны северного полушария по (Johnson et al., 2021) и диапазон измеренных значений в волжских водохранилищах ($\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$)

Месяц	Водохранилища умеренной зоны по (Johnson et al., 2021)		Волжские водохранилища Суммарный измеренный поток*
	диффузионный поток	пузырьковый поток	
Апрель	5.6	70.4	Ледостав
Май	6.8	98.5	0.1–11.2
Июнь	8.5	140.6	2.5
Июль	7.9	126.6	Нет данных
Август	5.6	90.0	0.1–315
Сентябрь	2.9	45.0	0.7–16.5
Октябрь	5.6	70.4	Нет данных

Примечание. * Суммарный измеренный удельный поток включает пузырьковую и диффузионную составляющие.

140 $\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$). Наибольшее содержание метана было характерно в период летней съемки в условиях отсутствия кислорода в придонной воде. Концентрации метана на глубинах более 16 м в приплотинных участках превышали 50 мкл/л , наибольшее значение составило 404 мкл/л (см. табл. 2).

В зимний период в большинстве водохранилищ содержание метана низкое (менее 10 мг/л с максимумом в придонном слое). В Черемшанском заливе Куйбышевского водохранилища зафиксированы концентрации метана до 133 мкл/л , в Рыбинском на станции Мать-Волга — 286 мкл/л . Повышенные концентрации в период ледостава говорят о том, что Рыбинское водохранилище может быть существенным источником выброса метана при разрушении ледяного покрова.

Водохранилища Волжского каскада, несмотря на некоторые различия термического и ледового режимов, относятся к умеренной зоне. Наиболее близкие значения удельного потока метана из волжских водохранилищ и водохранилищ, рассмотренных в работе (Johnson et al., 2021), приходятся на август (табл. 4). В мае–июне и сентябре фактические значения удельного потока в волжских водохранилищах значительно ниже. В апреле на большинстве волжских водохранилищ еще наблюдается ледостав, в то время как в работе (Johnson et al., 2021) указан отличный от нуля поток даже для водоемов бореальной зоны. В июле потоки могут быть аналогичными значениям в августе, а в октябре удельный поток метана скорее всего не превышает по значениям сентябрьский. В целом порядок измеренных значений удельного потока метана из волжских водохранилищ меньше, чем значений, приведенных для водохранилищ в работе (Johnson et al., 2021). Различия фактических измерений и опубликованной параметризации могут быть связаны с учетом в (Johnson et al., 2021) сезонности пузырькового и диффузионного потока по температуре воздуха, что не в полной мере отражает предикторы такого многофакторного и изменчивого во времени и пространстве процесса, как пузырьковая эмиссия.

ВЫВОДЫ

Исследование внутригодовых изменений содержания и эмиссии метана из волжских водохранилищ показало их значительную пространственно-временную изменчивость. Выявлены случаи содержания метана в придонных слоях водохранилищ, превышающие опубликованные ранее. Содержание метана в придонном слое более 200 мкл/л отмечено локально в заливах с низкой проточностью или на станциях при наличии бескислородных условий. Большие значения концентрации и удельного потока метана (десятки мкл/л и сотни $\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$) наблюдаются только в период наличия стратификации. В условиях конвективно-ветрового перемешивания из-за аэрации водной толщи и окисления метана его удельный поток не превышает 20 $\text{мгС-CH}_4/(\text{м}^2 \text{сут})$.

Во всех водохранилищах наблюдается значительная сезонная изменчивость удельного потока метана, связанная с особенностями синоптических условий конкретного года. При этом жаркая погода, вызывающая вспышки цветения воды, способствует снижению потока метана из-за его интенсивного окисления в условиях пересыщения поверхностного слоя кислородом. Снижение притока и проточности из-за малого количества осадков также способствует увеличению удельного потока метана.

В заливах Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ, принимающих притоки с повышенной минерализацией, возможно усиление стратификации из-за плотностного расслоения и формирования зон с дефицитом кислорода в придонном горизонте воды. На таких участках возможно увеличение удельного потока метана, несмотря на относительно небольшое количество органического вещества в грунтах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Полевые исследования на Рыбинском, Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах выполнены при поддержке ПАО РусГидро (договор 1010-416-2021 от 26.04.2021). Работы на Ивановском водохранили-

ще выполнены в рамках темы № FMWZ-2022-0002 “Разработка новых методических подходов к оценке гидроэкологического статуса водного объекта и его потенциала к самоочищению”, на Горьковском водохранилище в рамках темы АААА-А16-116032810054-3 “Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия” и при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” ННГУ (№ темы Н-468-99_2021-2023). Пространственный анализ данных по концентрации метана в воде — в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

FUNDING

Field studies at the Rybinsk, Kuibyshev, and Volgograd reservoirs were carried out with the support of PJSC RusHydro (agreement 1010-416-2021 of April 26, 2021). The studies at the Ivankovsky reservoir were implemented within the framework of the topic no. FMWZ-2022-0002 “Development of New Methodological Approaches to Assessing the Hydroecological Status of a Water Body and Its Self-Purification Potential,” at the Gorky reservoir within the framework of the topic АААА16-116032810054-3 “Hydrological Regime of Inland Water Bodies under Climate Change and Anthropogenic Impact” and with the financial support of the Strategic Academic Leadership Program Priority 2030 of UNN (topic no. Н-468-99_2021-2023). Spatial analysis of data on methane concentration in water was completed within the framework of the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University “The Future of the Planet and Global Environmental Changes.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверина А.А., Антипов Н.Е., Виногоров А.А., Воловцов А.А., Головин К.И., Кузнецов И.А., Овчинникова О.В., Петров Н.А., Полухин С.И., Сушинцев И.М., Хорошева А.С., Ефимов В.А., Ломов В.А., Фролова Н.Л. Оценка общего содержания метана в Рыбинском водохранилище в зимний период и расчет отдельных составляющих баланса метана // Исследования молодых географов: сб. статей участников зимних студенческих экспедиций. М., 2022. С. 71–80.
- Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2021. 366 с.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ. Водохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 290 с.
- ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ, 2017.
- Гречушникова М.Г., Бадюков Д.Д., Саввичев А.С., Казанцев В.С. Сезонные и пространственные изменения содержания метана в Можайском водохранилище в летний период // Метеорология и гидрология. 2017. № 11. С. 67–78.
- Гречушникова М.Г., Доброхотова Д.В., Капустин И.А., Мольков А.А., Лещев Г.В. Исследование изменчивости гидроэкологических характеристик в приплотинном участке Горьковского водохранилища в 2022 году / Материалы 7-ой всероссийской науч. конф. “Проблемы экологии Волжского бассейна”. Нижний Новгород: ФГБОУ ВО Волжский гос. ун-тет водного транспорта, 2022. Т. 5. С. 1–6.
- Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю., Ломов В.А. Эмиссия метана с поверхности долинного Можайского водохранилища // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 77–85. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-3\(77-85\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(77-85))
- Гречушникова М.Г., Ломова Д.В., Ломов В.А., Кременецкая Е.Р., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Федорова Л.П. Пространственно-временные различия гидроэкологических характеристик и эмиссии метана Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 81–89. <https://doi.org/10.31857/S0321059623010078>
- Гречушникова М.Г., Репина И.А., Степаненко В.М., Казанцев В.С., Артамонов А.Ю., Варенцов М.И., Ломова Д.В., Мольков А.А., Капустин И.А. Пространственно-временные изменения содержания и эмиссии метана в водохранилищах с различным коэффициентом водообмена // Изв. РГО. 2018. Т. 150. № 5. С. 14–33. <https://doi.org/10.7868/S086960711805002X>
- Дзюбан А.Н. Микробиологические процессы круговорота органического вещества в донных отложениях водохранилищ Волжско-Камского каскада // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 4. С. 262–271.
- Дзюбан А.Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 174 с.
- Дзюбан А.Н. Метан и процессы его трансформации в воде некоторых притоков Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 5. С. 571–576.
- Дзюбан А.Н. Цикл метана в грунтах водохранилищ Волжско-Камского каскада и его роль в деструкции органического вещества // Труды Ин-та биологии внутренних вод РАН. 2016. № 74 (77). С. 21–36.
- Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И., Молдцов Д.В. Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: анализ опыта исследований и организация проведения экспериментов в России // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2014. № 11. С. 146–159.
- Законнов В.В. Илонакопление в системе водохранилищ Волжского каскада // Труды Ин-та биологии внутренних вод РАН. 2016. Вып. 75 (78). С. 30–39.
- Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
- Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.
- Лазарева В.И., Степанова И.Э., Цветков А.И., Пряничникова Е.Г., Перова С.Н. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата — последствия для зоопланктона и зоо-

- обентоса // Труды Ин-та биологии внутренних вод РАН. 2018. Т. 81 (84). С. 47–84.
- Литвинов А.С., Рошупко В.Ф. Многолетние и сезонные колебания уровня Рыбинского водохранилища и их роль в функционировании его экосистемы // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 1. С. 33–40.
- Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 243 с.
- Минеева Н.М., Семадени И.В., Макарова О.С. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2017–2018 гг.) // Биология внутренних вод. 2020. № 2. С. 205–208.
- Никаноров Ю.И. Ивановское водохранилище // Изв. ГосНИОРХ. 1975. Т. 102. С. 5–25.
- Репина И.А., Терский П.Н., Горин С.Л., Агафонова С.А., Ахмерова Н.Д., Василенко А.Н., Гречушников М.Г., Григорьев В.Ю., Казанцев В.С., Лисина А.А., Ломов В.А., Мишин Д.В., Сазонов А.А., Степаненко В.М., Соколов Д.И., Тимошенко А.А., Фролова Н.Л., Шестеркин В.П. Натурные измерения эмиссии метана на крупнейших водохранилищах России в 2021 г. начало масштабных исследований 2021 г. // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 6. С. 713–718.
<https://doi.org/10.31857/S0321059622060141>
- РусГидро. Годовой отчет. М.: Русгидро, 2008. 124 с.
- Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону—М.: Ростиздат, 2005. 329 с.
- Чистая энергия. Заволжье: Русгидро, 2020. 15 с.
- Шашуловский В.А., Мосияш С.С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 250 с.
- Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environ. Science and Technology. 2010. Vol. 44. № 14. P. 5450–5455.
<https://doi.org/10.1021/es1005048>
- Bastviken D., Tranvik L., Downing J., Crill P., Enrich-Prast A. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink // USA: Science. 2011. Vol. 331. P. 6013–6063.
<https://doi.org/10.1126/science.1196808>
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., Del Sontro T., Barros N., Bezerra-Neto J.F., Powers S.M., dos Santos M.A., Vonk J.A. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // BioScience. 2016. Vol. 66. № 11. P. 949–964.
<https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
- Dzjuban A.N. Microbiological processes of methane transformation and organic matter decomposition in bottom sediments of the reservoirs of the Volga and Kama rivers // Hydrobiological J. 2004. Vol. 40. № 4. P. 69–74.
<https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v40.i4.60>
- Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // Nature. 2006. Vol. 444. P. 524–525.
<https://doi.org/10.1038/444524a>
- Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series / A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneau (Eds.). NY: Springer, 2005. 732 p.
- Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B., Du J., Genovese V. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // J. of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. Vol. 126 (8). P. 1–19.
<https://doi.org/10.1029/2021JG006305>
- Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited // Environ. Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. P. 13636–13641.
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3165-4>
- Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective // Mitigation Adaptation Strategy Global Change. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386.
<https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5>
- Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaysk Reservoir in summer period // E3S Web of Conferences IV Vinogradov Conference. 2020. № 163. Article 03010.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016303010>
- Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate // Bioscience. 2000. Vol. 50. P. 766–775.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0766:RSASOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2)
- Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R., Holgersson M.A., Liu S., Song C., Eyre B.D. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources // Nature Geoscience. 2021. Vol. 14. № 4. P. 225–230.
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>

Methane Concentration and Fluxes in Volga River Reservoirs

M. G. Grechushnikova^{1, 2}, I. A. Repina^{1, 3, *}, N. L. Frolova^{1, 2}, S. A. Agafonova^{1, 2}, V. A. Lomov^{1, 2, 3}, D. I. Sokolov^{1, 2}, V. M. Stepanenko^{1, 2, 3}, V. A. Efimov^{1, 2}, A. A. Mol'kov⁴, and I. A. Kapustin⁴

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

³Moscow State University, Research Computing Center, Moscow, Russia

⁴Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

*e-mail: repina@ifaran.ru

The paper presents the results of methane flux and its concentration measurements in the reservoirs of the Volga cascade: Ivankovskoye, Rybinskoye, Gorkovskoye, Kuybyshevskoye, and Volgogradskoye reservoirs. The article summarizes the materials from the 2017–2023 seasonal observations archive. Measurements of

the gas flux were carried out by the floating chamber method, the methane concentration determination in the samples was carried out by the headspace method. The spatial and seasonal variability of both methane content and its emissions depending on the coefficient of water exchange, weather conditions, the nature of bottom sediments, and depth was revealed. High values of methane concentration and methane flux are observed in the presence of stratification, while during vertical mixing, the flux values decrease significantly. The highest methane flux values are characteristic of the heavily populated by macrophytes shallow Shoshinskiy reach of the Ivankovskoye reservoir (up to 334 mgC-CH₄/(m² day)), the flooded left bank floodplain of the Gorkovskoye reservoir (up to 548 mgC-CH₄/(m² day)), where they are associated with weak flow and intra-mold circulation, and also for Chesnava bay of the Rybinskoye reservoir (up to 1086 mgC-CH₄/(m² day)), associated with anthropogenic pollution and low flow rates. In the bays of Kuybyshevskoye and Volgogradskoye reservoirs that receive inflows with increased mineralization, stratification may increase due to density stratification, the formation of zones with oxygen deficit, and increase in methane flux despite the small amount of organic matter in sediments. The example of the Gorkovskoye reservoir shows the effect of the dam on the spatial structure of methane flux and concentration. Comparison with generalized data on specific methane flows from moderate water reservoirs showed that in the Volga cascade, these values are lower in all months of the open water period except August.

Keywords: methane, flux, reservoir, destruction, water exchange, flowering

REFERENCES

- Averina A.A., Antipov N.E., Vinogorov A.A., Volovodov A.A., Golovnin K.I., Kuznechenko I.A., Ovchinnikova O.V., Petrov N.A., Poluhin S.I., Sushincev I.M., Horosheva A.S., Efimov V.A., Lomov V.A., Frolova N.L. Assessment of the total methane content in the Rybinsk reservoir in winter and calculation of individual components of the methane balance. In *Issledovaniya molodykh geografov: sb. statei uchastnikov zimnikh studentcheskikh ekspeditsii* [Research by Young Geographers. Collection of Articles by Participants of Winter Student Expeditions]. Moscow: MGU, 2022, pp. 71–80. (In Russ.).
- Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environ. Sci. Technol.*, 2010, vol. 44, no. 14, pp. 5450–5455. <https://doi.org/10.1021/es1005048>
- Bastviken D., Tranvik L., Downing J., Crill P., Enrich-Prast A. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *USA: Science*, 2011, vol. 331, pp. 6013–6063. <https://doi.org/10.1126/science.1196808>
- Chistaya energiya* [Clean Energy]. Zavolzhye: Rushydro Publ., 2020. (In Russ.).
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., Del Sontro T., Barros N., Bezerra-Neto J.F., Powers S.M., dos Santos M.A., Vonk J.A. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*, 2016, vol. 66, no. 11, pp. 949–964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
- Dzyuban A.N. Microbiological processes of organic matter circulation in bottom sediments of reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Water Resour.*, 1999, vol. 26, no. 4, pp. 262–271. (In Russ.).
- Dzyuban A.N. Microbiological processes of methane transformation and organic matter decomposition in bottom sediments of the reservoirs of the Volga and Kama rivers. *Hydrobiol. J.*, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 69–74. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v40.i4.60>
- Dzyuban A.N. *Destruktsiya organicheskogo veshchestva i tsikl metana v donnykh otlozheniyakh vnutrennikh vo-*
doemov [Destruction of Organic Matter and Methane Cycle in Bottom Sediments of Inland Reservoirs]. Yaroslavl: Printhouse Publ., 2010. 174 p.
- Dzyuban A.N. Methane and its transformation processes in water of some tributaries of the Rybinsk Reservoir. *Water Resour.*, 2011, vol. 38, pp. 615–620. <https://doi.org/10.1134/S0097807811050046>
- Dzyuban A.N. The methane cycle in the soils of reservoirs of the Volga-Kama cascade and its role in the destruction of organic matter. In *Tr. Inst. biologii vnutrennikh vod RAN. T. 77* [Proc. Inst. of Biology of Inland Waters RAS. Vol. 77], 2016, pp. 21–36. (In Russ.).
- Elistratov V.V., Maslikov V.I., Sidorenko G.I., Molodtsov D.V. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs: analysis of research experience and organization of experiments in Russia. *Altern. Energetica Ecol. (ISJAE)*, 2014, no. 11, pp. 146–159. (In Russ.).
- Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khoro-shevskaya V.O. *Metan v vodnykh ekosistemakh* [Methane in Aquatic Ecosystems]. Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ., 2005. 329 p.
- Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. *Faktory formirovaniya kontsentratsii metana v vodnykh ekosistemakh* [Factors of Formation of Methane Concentrations in Aquatic Ecosystems]. Rostov-on-Don: Southern Fed. Univ. Publ., 2021. 366 p.
- Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch. Vodokhranilishcha Verkhnei Volgi* [Hydrometeorological Regime of Lakes and Reservoirs. Reservoirs of the Upper Volga]. Leningrad: Hydrometeoizdat Publ., 1975. 290 p.
- Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*, 2006, vol. 444, pp. 524–525. <https://doi.org/10.1038/444524a>
- GOST 23740-2016. Grunty. Metody opredeleniya soderzhaniya organicheskikh veshchestv* [State Standard 23740-2016. Soils. Methods for Determining the Content of Organic Substances]. Moscow: Standartinform Publ., 2017.
- Grechushnikova M.G., Badyukov D.D., Savvichev A.S., Kazantsev V.S. Seasonal and spatial changes in methane content in Mozhaik reservoir in summer. *Meteorol. Hydrol.*, 2017, no. 11, pp. 67–78. (In Russ.).
- Grechushnikova M.G., Dobrohotova D.V., Kapustin I.A., Mol'kov A.A., Leshchev G.V. Study of the variability of

- hydrological characteristics in the near-dam section of the Gorky reservoir in 2022. In *Materialy 7-oi vserossiiskoi nauch. konf. "Problemy ekologii Volzhskogo basseina". T. 5* [Proc. of the 7th All-Russian Sci. Conf. "Problems of Ecology of the Volga Basin". Vol. 5]. Nizhny Novgorod: Volga St. Univ. Water Transp., 2022, pp. 1–6. (In Russ.).
- Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M., Kazantsev V.S., Artamonov A.Yu., Lomov V.A. Methane Emission From the Surface of the Mozhaik Valley-Type Reservoir. *Geogr. Nat. Resour.*, 2019, vol. 40, pp. 247–255.
<https://doi.org/10.1134/S1875372819030077>
- Grechushnikova M.G., Lomova D.V., Lomov V.A., Kremetskaya E.R., Grigor'eva I.L., Komissarov A.B., Fedorova L.P. Space and Time Variations of Hydroenvironmental Characteristics of the Ivankovo Reservoir in Years with Different Weather Conditions. *Water Resour.*, 2023, vol. 50, pp. 109–116.
<https://doi.org/10.1134/S0097807823010074>
- Grechushnikova M.G., Repina I.A., Stepanenko V.M., Kazantsev V.S., Artamonov A.Yu., Varentsov M.I., Lomova D.V., Mol'kov A.A., Kapustin I.A. Spatial and temporal variations of methane content and emission in reservoirs with different water exchange coefficient. *Izv. Russ. Geogr. Obshch.*, 2018, vol. 150, no. 5, pp. 14–33. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S086960711805002X>
- Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series.* Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M., Eds. N.Y.: Springer, 2005. 732 p.
- Ivan'kovskoe vodokhranilishche: Sovremennoe sostoyanie i problemy okhrany* [Ivan'kovskoe Reservoir: Current State and Problems of Protection]. Moscow: Nauka Publ., 2000. 344 p.
- Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B., Du J., Genovese V. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2021, vol. 126, no. 8, pp. 1–19.
<https://doi.org/10.1029/2021JG006305>
- Kuibyshevskoe vodokhranilishche (nauchno-informatsionnyi spravochnik)* [Kuibyshev Reservoir (Scientific Information Guide)]. Tolyatti: IEVB RAS Publ., 2008. 123 p.
- Lazareva V.I., Stepanova I.E., Tsvetkov A.I., Pryanichnikova E.G., Perova S.N. Oxygen regime of the Volga and Kama reservoirs during the period of climate warming – consequences for zooplankton and zoobenthos. In *Tr. Inst. biologii vnutrennikh vod RAN. T. 84* [Proc. Inst. of Biology of Inland Waters RAS. Vol. 84], 2018, pp. 47–84. (In Russ.).
- Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2014, vol. 21, pp. 13636–13641.
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3165-4>
- Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, 2006, vol. 13, pp. 1381–1386.
<https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5>
- Litvinov A.S., Roshhupko V.F. Long-term and seasonal water level fluctuations of the Rybinsk Reservoir and their role in the functioning of its ecosystem. *Water Resour.*, 2007, vol. 34, pp. 27–34.
<https://doi.org/10.1134/S0097807807010034>
- Lomov V., Grechushnikova M., Kazantsev V., Repina I. Reasons and patterns of spatio-temporal variability of methane emission from the Mozhaysk Reservoir in summer period. *E3S Web of Conf. IV Vinogradov Conf.*, 2020, no. 163, article 03010.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016303010>
- Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases. *BioScience*, 2000, vol. 50, no. 9, pp. 766–775.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0766:RSASOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2)
- Martynova M.V. *Donnye otlozheniya kak sostavlyayushchaya limnicheskikh ekosistem* [Bottom Sediments as a Component of Limnic Ecosystems]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 243 p.
- Mineeva N.M., Semadeny I.V., Makarova O.S. Chlorophyll Content and the Modern Trophic State of the Volga River Reservoirs (2017–2018). *Inland Water Biol.*, 2020, vol. 13, pp. 327–330.
<https://doi.org/10.1134/S199508292002008X>
- Nikanorov Yu.I. Ivankovskoe reservoir. *Izv. GosNIORH*, 1975, vol. 102, pp. 5–25. (In Russ.).
- Repina I.A., Terskii P.N., Gorin S.L., Agafonova S.A., Akhmerova N.D., Vasilenko A.N., Grechushnikova M.G., Grigor'ev V.Yu., Kazantsev V.S., Lisina A.N., Lomov V.A., Mishin D.V., Sazonov A.A., Stepanenko V.M., Sokolov D.I., Timoshenko A.A., Frolova N.L., Shesterkin V.P. Field Measurements of Methane Emission at Largest Reservoirs in Russia in 2021. The Start of Large-Scale Studies. *Water Resour.*, 2022, vol. 49, pp. 1003–1008.
<https://doi.org/10.1134/S0097807822060148>
- Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R., Holgerson M.A., Liu S., Song C., Eyre B.D. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nat. Geoscience*, 2021, vol. 14, no. 4, pp. 225–230.
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2>
- RusGidro. Godovoi otchet* [RusHydro. Annual Report]. Moscow: Rushydro Publ., 2008. 124 p.
- Shashulovskij V.A., Mosiyash S.S. *Formirovanie biologicheskikh resursov Volgogradskogo vodokhranilishcha v khode suktsessii ego ekosistemy* [Formation of Biological Resources of the Volgograd Reservoir during the Succession of its Ecosystem]. Moscow: Tovar. Nauch. Izdan. KMK Publ., 2010. 250 p.
- Zakonov V.V. Silt accumulation in the reservoir system of the Volga cascade. In *Tr. Inst. biologii vnutrennikh vod RAN. T. 78* [Proc. Inst. of Biology of Inland Waters RAS. Vol. 78], 2016, pp. 30–39. (In Russ.).

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

УДК 556.5

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОСТОЯНИЯ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА КАСПИЙСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

© 2023 г. Е. В. Островская^а, *, Е. В. Гаврилова^а, И. В. Гонтовая^а,
В. О. Татарников^а, М. А. Очеретный^а

^аКаспийский морской научно-исследовательский центр, Астрахань, Россия

*e-mail: eoostrovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 07.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Основная цель данной работы — обобщение данных многолетних наблюдений за гидрометеорологическими параметрами в Каспийском макрорегионе. Средняя годовая температура воздуха за последние 30 лет в регионе увеличилась на 1.0°C, температура поверхностного слоя воды — на 0.3°C, прослеживается значимая меридиональная неоднородность их распределения. В настоящее время суммарный речной сток в море составляет около 275 км³. В 1996–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг. наблюдается уменьшение объема годового стока для всех рек, впадающих в Каспийское море. Интенсивность снижения речного стока за 1996–2020 гг. в среднем составила 0.12 км³ в год, при этом наиболее интенсивно снижался сток Волги и Куры. В условиях потепления и снижения стока продолжается снижение уровня Каспийского моря, начавшееся в конце 1990-х годов. К началу 2023 г. средняя отметка уровня достигла –28.70 м относительно нуля Балтийской системы, что примерно на 2 м ниже по сравнению с отметкой 1995 г. Приводится оценка осушения прибрежных территорий, которое к настоящему времени составило более 22 тыс. км² преимущественно в северной наиболее мелководной части моря. Обсуждаются изменения ветрового режима, наблюдаемого увеличения среднемесячной и среднегодовой скорости ветра относительно стандартного опорного периода. Установлено, что наибольшей повторяемостью отличаются восточные и западные ветры, которые вызывают штормовые сгоны и нагоны, оказывающие разрушительное воздействие на прибрежные территории. Приводится статистика сгонно-нагонных явлений для 4 морских станций за 2010–2021 гг. Амплитуда сгонно-нагонных колебаний уровня в районе Лаганы достигает максимальной величины 3.0–3.5 м, в то время как в Махачкале она составляет около 1 м. Приводится анализ сезонной изменчивости сгонно-нагонных колебаний.

Ключевые слова: Каспийское море, Волга, изменения климата, температура воздуха, температура воды, уровень моря, речной сток, ветер, сгоны, нагоны

DOI: 10.31857/S2587556623060109, **EDN:** AXJSNZ

ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море — самый крупный замкнутый солоноватый водоем на Земле. Основными его особенностями являются изолированность от Мирового океана и существенная меридиональная протяженность. Являющийся, по сути, огромным озером, но из-за своих размеров называемый морем, Каспий располагается в двух климатических зонах: умеренной и сухих субтропиков (южная часть моря).

Следуя терминологии (Методы ..., 2012), в этой работе климатические изменения определяются как отличие современных климатических условий в определенной области от условий предыдущих периодов. Исследования свидетельствуют о

том, что в этом смысле климатические условия Каспийского макрорегиона в настоящее время меняются (Третий ..., 2022). В первую очередь это касается увлажнения и температурного режима, а также связанного с ними ледового режима в северной части моря. Средняя годовая температура воздуха за последние 30 лет в российской части моря увеличилась на 1.0°C, скорость потепления составила в среднем 0.46°C/10 лет (Проблемы ..., 2021), при том, что в глобальном масштабе эта величина существенно ниже — 0.19°C/10 лет¹. Это

¹ https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20166#.ZFQq3kvP2U1 (дата обращения 15.03.2023); https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20130#.ZFQq3kvP2U1 (дата обращения 15.03.2023).

привело к повышению средней за период температуры поверхностного слоя воды на российских островных гидрометеорологических станциях на 0,4°C (Курапов и др., 2020).

Существенное потепление в зимний сезон привело к смягчению ледовых условий в северо-западной части Каспия. Снизилось количество суровых зим. Периодичность суровых зим в XX в. составляла 15–16 лет, а в современный климатический период (1991–2020 гг.) – 27 лет (одна суровая зима 2011/2012 гг.). Среднее число дней в ледовый период со льдом в современных условиях на о. Тюлений составило 31 день, сократившись по сравнению со средней многолетней продолжительностью на 19 дней, а сроки полного очищения ото льда сдвинулись на 17 дней в сторону более ранних дат (Проблемы ..., 2021). С каждым годом уменьшается зона распространения льда и толщина ледяного покрова (Лобанов, Наурозбаева, 2021; Проблемы ..., 2021).

С повышением температуры воздуха наблюдается устойчивая тенденция к снижению количества осадков и повышению испарения с поверхности моря и прилегающих территорий. Интенсивность снижения количества осадков составила 1.9 мм в год, в то время как испарение увеличивается в среднем на 2.1 мм в год.

Наблюдающиеся климатические изменения оказывают воздействие на различные отрасли региональной экономики, связанные с морем (добыча нефти и газа, судоходство, рыболовство и добыча морепродуктов, сельскохозяйственное производство, рекреационные ресурсы), а также на здоровье и благополучие населения региона (Третий ..., 2022).

Эти изменения отражаются на гидролого-гидрохимическом режиме моря, его экосистеме и биологических ресурсах. Последствия климатических изменений для морских и прибрежных экосистем региона зарубежными исследователями уже называют катастрофическими (Lahijani et al., 2023b; Prange et al., 2020). Они привели к снижению биопродуктивности Северного Каспия, условия для развития биологических сообществ стали менее благоприятными (Курапов и др., 2020). Наблюдаются вспышки цветения водорослей в прибрежной зоне и на мелководье в летний период, эвтрофикация, гипоксия (Катунин, 2014). Смягчение ледового режима, учащение зим без устойчивого ледяного покрова представляют существенную угрозу популяции единственного каспийского млекопитающего – тюленя, поскольку практически приводят к исчезновению мест размножения для них (Prange et al., 2020). Опустынивание, усыхание прибрежных территорий, заливов, водно-болотных угодий, речных дельт, распространение пожаров на осушенных территориях угрожают жизни и здоровью людей и экономической деятельности на при-

брежных территориях (Lahijani et al., 2023a; Lattuada et al., 2019).

В связи с этим представляется актуальным изучение основных гидрометеорологических процессов, происходящих в Каспийском макрорегионе, и особенностей их современных изменений под действием меняющегося климата, а также влияния климатических факторов на состояние окружающей среды и экосистему Каспийского моря для обеспечения устойчивого развития региона и разработки мер по адаптации к изменениям климата и смягчению их неблагоприятных последствий.

Основная цель данной работы – обобщение многолетних наблюдений за гидрометеорологическими параметрами в Каспийском регионе для оценки их изменчивости в условиях меняющегося климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались данные наблюдений за ветром, уровнем моря, стоком Волги на государственной наблюдательной сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) (8 морских и 23 устьевых станций и постов), а также данные гидрометеорологических служб прикаспийских государств, получаемые по 23 морским станциям в рамках международного обмена по линии Координационного комитета по гидрометеорологии Каспийского моря (КАСПКОМ) (рис. 1).

В соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (ВМО)², период осреднения для получения климатических норм должен составлять 30 лет. На 16-й сессии Комиссии по климатологии ВМО было принято решение о сохранении периода 1961–1990 гг. в качестве стабильного базового периода ВМО для долгосрочной оценки изменчивости и изменения климата и для этих целей нормы пересчитывать, как и прежде, через 30 лет. Для целей мониторинга климата и оперативной оценки аномальности текущей погоды 30-летние климатологические стандартные нормы ВМО должны обновляться каждые десять лет. Во исполнение этого решения во ВНИИГМИ-МЦД рассчитаны нормы основных климатических параметров (температуры воздуха, осадков, упругости водяного пара, атмосферного давления на уровне моря) на территории России за три 30-летних периода с шагом 10 лет: 1961–1990, 1971–2000 и 1981–2010 гг. Данные наблюдений за гидрометеорологическими параметрами, получаемые в рамках КАСПКОМ, позволяют рассчитать нормы для периода последнего тридцатилетия с 1991 по 2020 г.

²https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20166#.ZF0q3kvP2U1 (дата обращения 16.03.2023).



Рис. 1. Наблюдательная сеть Росгидромета и станции КАСПКОМ.

Данными для исследования послужили среднемесячные величины температуры воздуха и температуры поверхностного слоя воды на гидрометеорологических постах, расположенных на побережье Каспийского моря на территории всех прикаспийских стран (см. рис. 1). Для расчетов выбраны станции с максимальной длиной рядов наблюдений. Всего для северной части моря обработано 2160 значений температуры воздуха (три станции – о-ва Тюлений, Пешной, Кулалы), для центральной части – 2863 (четыре станции – Махачкала, Дербент, Актау, Форт-Шевченко), для южной – 720 (одна станция – Энзели). Массив данных по температуре воды для Северного Каспия составляет 1960 наблюдений (три станции – о-ва Тюлений, Пешной, Кулалы), для Среднего – 2303 (четыре станции – Махачкала, Дербент, Актау, Форт-

Шевченко), для Южного – 1841 (три станции – Баку, Огурчинский, Сумгаит). Для каждого 30-летнего периода рассчитывались среднее многолетнее и среднеквадратическое отклонение. Значения аномалий рассчитывались как разница между климатической нормой (1961–1990 гг.) и средним значением для современного периода (1991–2020 гг.).

Для исследования многолетней изменчивости суммарного речного стока в Каспийское море также использовались данные среднемесячных величин стока рр. Волги ($N = 694$), Терека ($N = 651$), Сулака ($N = 442$), Урала ($N = 696$), Куры ($N = 691$), Сефидруда ($N = 643$), Хараза ($N = 692$), Чалуса ($N = 685$) и Полруда ($N = 690$) за период 1991–2020 гг., расчеты проводились по отдельным странам.

Для оценки изменений уровня моря использовались среднегодовые величины уровня на российских станциях г. Махачкалы и о. Искусственного. Отметки среднего положения уровня Каспийского моря рассчитывались по данным семи постов с наиболее длинными рядами наблюдений: Баку, Нефт Дашлары (Нефтяные Камни), Махачкала, Форт-Шевченко, Гувлымак (Куули-Маяк), Туркменбаши (Красноводск), Дузлыбогаз (Кара-Богаз-Гол).

Исследование сгонно-нагонных явлений проводилось по российским прибрежным (Лагань, Махачкала) и островным (о-ва Искусственный, Тюлений) морским гидрометеорологическим станциям. Использовались средние суточные, месячные данные наблюдений за уровнем моря, а также регулярные наблюдения за ветром, которые проводились на станциях о. Тюлений, Махачкала, Астрахань. Рассматривались лишь такие сгоны и нагоны, которые превышали среднемесячный уровень моря на 30 см и более. Для выделения сгонов и нагонов из среднесуточных данных за определенный месяц вычиталось среднее месячное значение уровня моря. Общее число обработанных доступных данных за период 2010–2021 гг. (12 лет) составило 17520.

Анализ возможных изменений береговой линии северной части Каспийского моря выполнен в среде QGIS 2.16.1. В качестве основы была использована глобальная модель рельефа океана и суши “The GEBCO_2022 Grid”. Эта модель рельефа предоставляет данные о высоте в метрах на сетке с интервалом 15 угловых секунд, состоящей из 43200 строк $\times$ 86400 столбцов, что дает 3732480000 точек данных. Значения данных зарегистрированы по центру пикселя, т.е. относятся к высоте в метрах в центре ячеек сетки. Полученные растровые данные о высоте были обрезаны по границам исследуемого района и на их основе построен векторный слой с изолиниями с шагом в 1 м. Также были добавлены имеющиеся фактические данные о границе береговой линии при уровне моря –28 м (БС), в формате векторного слоя. На основе этих данных были выделены зоны осушения, как районы между изолиниями –28, –29, –30 и –31 м. Далее по изолиниям был создан векторный слой с изобатами (2, 5, 10, 20 и 50 м) при уровне моря –31 м.

Статистический анализ проведен с помощью программ Microsoft Excel и Statistica 6.0. Значимость статистических различий между оценками исследуемых параметров оценивалась по критериям Стьюдента–Фишера при уровне $\alpha = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение температуры воздуха и поверхностного слоя морской воды

Среднегодовая температура приземного слоя воздуха в регионе Каспийского моря в последний 30-летний период увеличилась на 1.0°C в сравнении с базовым климатическим периодом. Наиболее существенное увеличение температуры воздуха пришлось на зимние месяцы. Максимальные значения температуры, наблюдаемые в современный период, также увеличились относительно базового периода. Наиболее существенное увеличение максимальных значений пришлось на осень. Значения минимальных температур воздуха в современный период снизились. Наиболее существенное снижение значений минимальных температур пришлось на осень. Для весны было отмечено увеличение значений минимальных температур. В целом это говорит о расширении диапазона температур воздуха, наблюдаемых в регионе Каспийского моря.

Наиболее существенное повышение среднегодовой температуры воздуха относительно базового климатического периода наблюдалось в районе Среднего Каспия (табл. 1), в основном за счет роста температуры в зимние месяцы. В районе Среднего и Южного Каспия наибольшее увеличение температуры воздуха приходилось на летние месяцы. Все различия статистически значимы при уровне $\alpha = 0.05$.

Меридиональный градиент разницы между среднегодовой температурой в диапазоне широт менее 38° и более 46° с.ш. в современный период составляет 7.4°C . Разница температур между северной частью Каспийского моря и южной с 1960-х по начало 2000-х годов постоянно снижалась (рис. 2). Период с середины 1980-х по начало 2000-х годов можно охарактеризовать как период с наименьшим значением меридионального градиента. С начала 2000-х годов по настоящее время значение меридионального градиента резко увеличилось и превысило значения начального периода. Неоднородность временного хода меридионального градиента была обусловлена более ранним началом повышения температуры воздуха в северной части региона Каспийского моря. Температура воздуха на несколько лет раньше начала увеличиваться в северной части региона (см. рис. 2). За счет большей интенсивности увеличения температуры воздуха в южной части региона в современный период значение меридионального градиента чуть превысило его значения, наблюдавшиеся в начале 1960-х годов.

Средняя за год температура поверхностного слоя воды Каспийского моря относительно базового периода увеличилась на 0.3°C . Наиболее существенное увеличение средних значений отме-

Таблица 1. Температура приземного слоя воздуха в прибрежной зоне Каспийского моря, °С

Период	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Северный Каспий (о-ва Кулалы, Пешной, Тюлений)					
1961–1990	−3.5 ± 4.4	10.0 ± 7.4	24.2 ± 1.7	11.0 ± 6.3	10.4 ± 11.2
1971–2000	−3.2 ± 4.2	9.9 ± 7.2	24.4 ± 1.7	11.0 ± 6.5	10.5 ± 11.1
1981–2010	−2.5 ± 3.9	10.0 ± 7.3	24.7 ± 1.8	11.7 ± 6.5	11.0 ± 10.9
1991–2020	−2.3 ± 3.9	10.8 ± 6.7	25.1 ± 1.8	11.9 ± 6.7	11.4 ± 11.0
Аномалия	1.2	0.8	0.9	0.9	1.0
Средний Каспий (Актау, Дербент, Махачкала, Форт-Шевченко)					
1961–1990	0.8 ± 3.2	10.6 ± 5.6	23.5 ± 1.9	13.3 ± 5.3	12.1 ± 9.1
1971–2000	0.9 ± 2.9	10.7 ± 5.5	23.8 ± 1.9	13.2 ± 5.6	12.2 ± 9.2
1981–2010	1.3 ± 2.8	10.9 ± 5.2	24.2 ± 2.0	13.7 ± 5.6	12.6 ± 9.2
1991–2020	1.6 ± 2.8	11.4 ± 5.2	24.8 ± 2.1	14.1 ± 5.8	13.0 ± 9.3
Аномалия	0.8	0.8	1.3	0.8	0.9
Южный Каспий (Энзели)					
1961–1990	7.9 ± 2.5	13.8 ± 4.4	25.0 ± 1.4	18.0 ± 3.8	16.2 ± 7.0
1971–2000	7.7 ± 2.3	13.7 ± 4.4	25.1 ± 1.5	18.1 ± 4.0	16.1 ± 7.1
1981–2010	8.2 ± 2.1	13.8 ± 4.1	25.2 ± 1.6	18.4 ± 3.9	16.4 ± 7.0
1991–2020	8.5 ± 2.0	14.3 ± 4.2	25.7 ± 1.7	18.6 ± 4.1	16.8 ± 7.0
Аномалия	0.6	0.5	0.7	0.5	0.6

чается в осенние месяцы для Среднего и Южного Каспия, в зимние – для Северного. Для всех станций Каспийского моря в последний тридцатилет-

ний период характерны положительные аномалии среднегодовой температуры воды поверхностного слоя (табл. 2), различия между

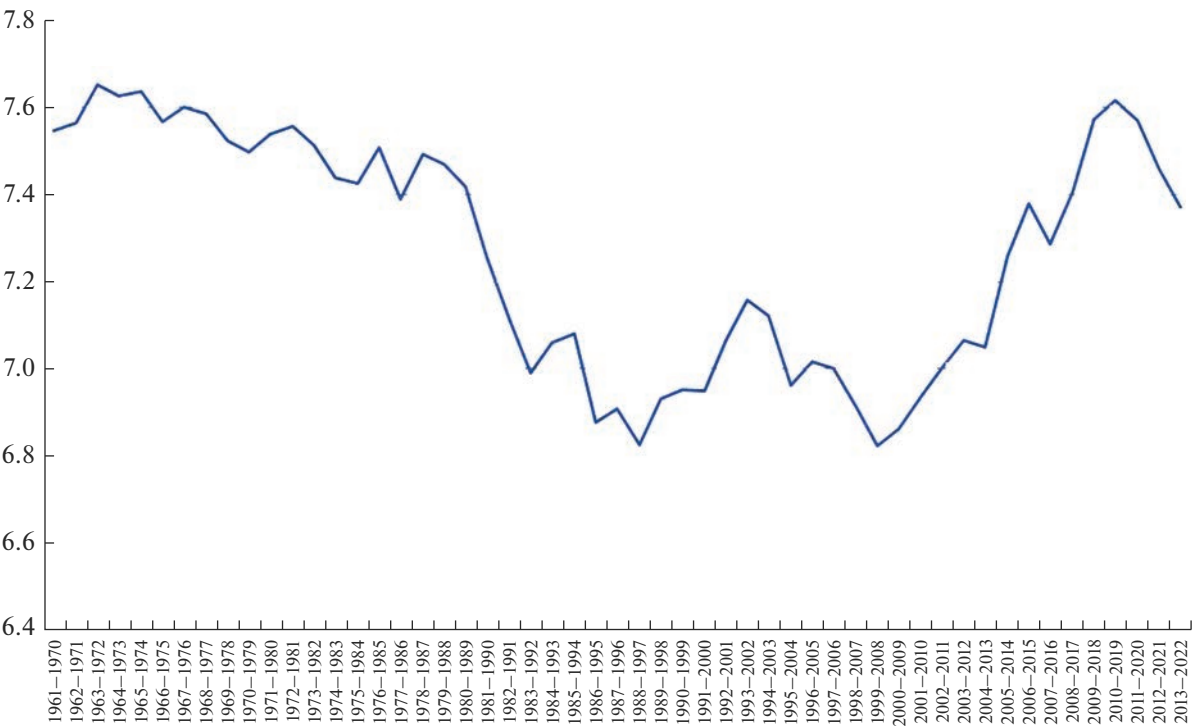


Рис. 2. Значение меридионального градиента температуры воздуха в регионе Каспийского моря.

Таблица 2. Температура поверхностного слоя воды в прибрежной зоне Каспийского моря, °С

Период	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
Северный Каспий (о-ва Кулалы, Пешной, Тюлений)					
1961–1990	0.8 ± 1.2	11.2 ± 6.7	24.5 ± 1.5	12.0 ± 5.9	12.2 ± 9.5
1971–2000	0.8 ± 1.1	10.8 ± 6.6	24.5 ± 1.5	12.0 ± 6.0	12.1 ± 9.6
1981–2010	1.1 ± 1.3	10.7 ± 6.3	24.5 ± 1.8	12.4 ± 5.9	12.2 ± 9.4
1991–2020	1.4 ± 1.3	11.1 ± 6.2	24.4 ± 2.3	12.3 ± 5.9	12.3 ± 9.3
Аномалия	0.6	0.1	0.1	0.3	0.1
Средний Каспий (Актау, Дербент, Махачкала, Форт-Шевченко)					
1961–1990	2.8 ± 2.3	9.7 ± 5.2	21.8 ± 2.4	14.3 ± 4.9	12.1 ± 8.0
1971–2000	3.0 ± 2.1	9.8 ± 5.0	21.8 ± 2.9	14.5 ± 4.9	12.3 ± 7.9
1981–2010	3.3 ± 2.2	9.8 ± 4.7	21.7 ± 3.1	15.0 ± 4.7	12.5 ± 7.8
1991–2020	3.4 ± 2.2	10.1 ± 4.6	22.0 ± 3.2	15.1 ± 4.8	12.7 ± 7.8
Аномалия	0.6	0.4	0.2	0.8	0.6
Южный Каспий (Баку, Огурчинский, Сумгаит)					
1961–1990	6.4 ± 2.0	12.7 ± 4.6	24.7 ± 2.0	17.5 ± 4.5	15.3 ± 7.6
1971–2000	6.3 ± 1.9	12.6 ± 4.5	24.6 ± 2.1	17.4 ± 4.6	15.3 ± 7.6
1981–2010	6.4 ± 1.9	12.5 ± 4.5	24.7 ± 2.5	17.8 ± 4.6	15.3 ± 7.6
1991–2020	6.5 ± 1.9	13.0 ± 4.6	25.1 ± 2.7	17.9 ± 4.8	15.6 ± 7.8
Аномалия	0.1	0.3	0.4	0.4	0.3

средними в стандартный и современный климатический периоды статистически значимы при уровне $\alpha = 0.05$.

Наиболее существенное повышение средней температуры воды произошло в Среднем Каспии (рис. 3), составив 0.6°C . Наиболее интенсивно выросла температура воды осенью, менее всего — летом. В Южном Каспии наибольшее повышение температуры в современный период отмечается в летние и осенние месяцы.

Сопоставление значений аномалии температуры воздуха и температуры поверхностного слоя воды (см. табл. 1 и 2) показало определенную связь между ними только в северной части моря, что, очевидно, связано с ее мелководностью и, как следствие, способностью к быстрому отклику вод на нагрев прилегающих слоев атмосферы.

Изменения речного стока и уровня Каспийского моря

Каспийское море является принимающим водоемом Волги, связь с которой прослеживается с неогена (Рычагов и др., 2010). За это время устье Волги многократно перемещалось относительно современного положения то к югу, то к северу на сотни и тысячи километров (Обедиев, 1977; Сиднев, 1985). На развитие устьевой области Волги определяющее влияние оказывали колебания уровня Каспийского моря в различные геологические эпохи (Леонтьев, 1977; Рычагов и др.,

2010). Взаимодействие реки и приемного морского бассейна сложное, постоянно трансформирующееся как рельеф взморья, так и перераспределение речной воды по дельтовым водотокам.

Приходную статью водного баланса Каспийского моря составляют атмосферные осадки, поверхностный и подземный сток, расходную — испарение и сток в залив Кара-Богаз-Гол. Непостоянство элементов водного баланса приводит к межгодовым колебаниям уровня моря. В свою очередь, изменчивость элементов водного баланса в наибольшей степени определяется климатическими факторами (Водный ..., 2016).

В настоящее время суммарный речной сток в море составляет около 275 км^3 . По всем рекам, впадающим в Каспийское море, в 1996–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг. наблюдается уменьшение объема стока (табл. 3). Интенсивность снижения речного стока за период 1996–2020 гг. в среднем составила 0.12 км^3 в год, при этом наиболее интенсивное снижение стока было зафиксировано для Волги и Куры. В то же время следует отметить, что явно выраженного линейного тренда на исследуемых временных рядах не проявляется, в данном временном интервале встречаются как маловодные, так и многоводные годы.

Как правило, наибольшее значение речного стока приходится на начало весны — период половодья (см. табл. 3). Для северной части моря (Россия, Казахстан) характерны минимальные

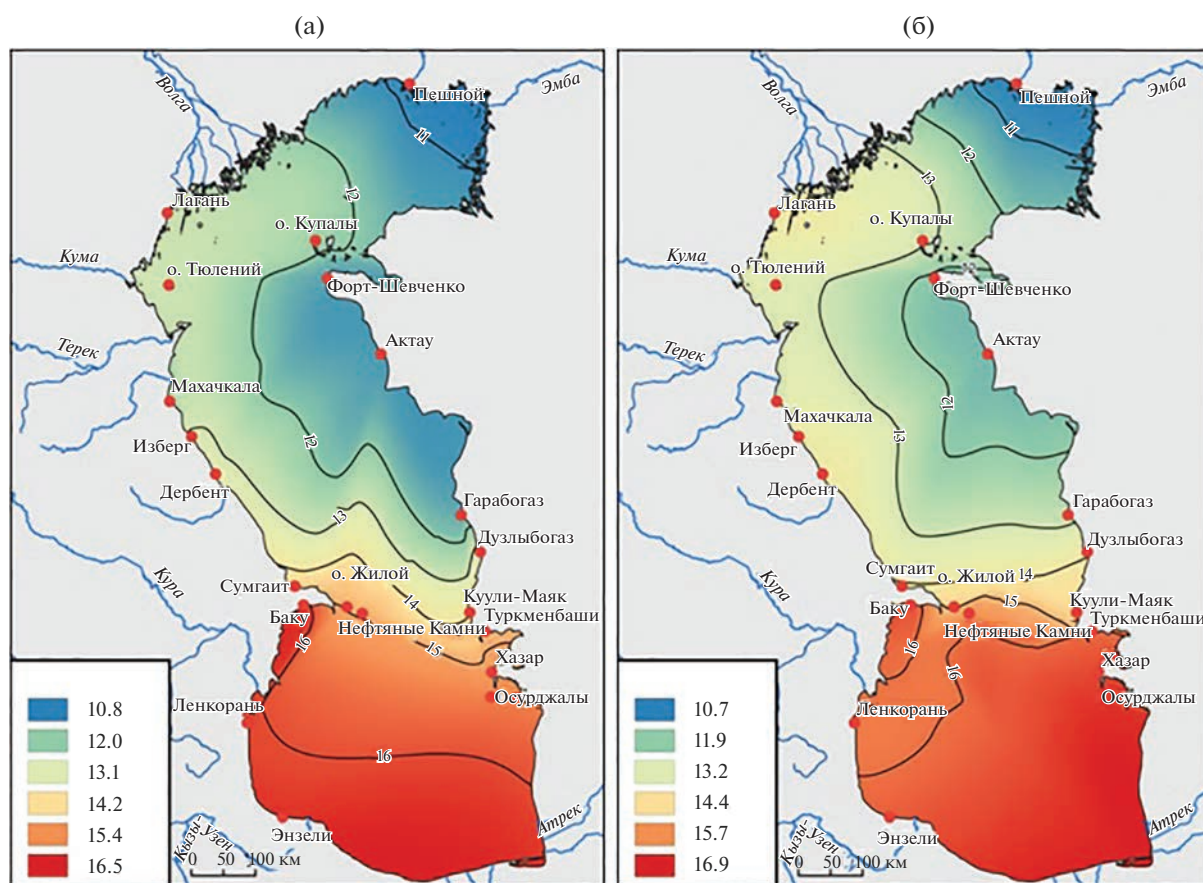


Рис. 3. Сравнение распределения средней температуры воды за: 1961–1990 гг. (а), и 1991–2020 гг. (б).

значения стока в зимний период, для южной (Азербайджан, Иран) — летом и в начале осени.

На фоне снижения количества осадков, повышения испарения и общего потепления наблюдается снижение водного стока рек Каспийского бассейна, в первую очередь Волги, на долю которой приходится более 80% общего речного стока (Водный ..., 2016). Изменения речного стока, в частности особенно важного для экосистем и водных биоресурсов весеннего стока, происходят на всей территории Волжского бассейна, при этом в самой южной части бассейна объем половодного стока уменьшился почти на 60% (Георгиевский и др., 2018). По сравнению с предшествующим периодом уменьшилось количество многоводных лет, т.е. маловодье на Волге теперь наблюдается чаще, хотя и не так часто, как это было в период 1961–1977 гг. (рис. 4).

В условиях нарастающего маловодья наблюдается тенденция к снижению уровня Каспийского моря, начавшаяся в конце 1990-х годов. На рис. 5 показана синхронность изменений уровня моря и разностно-интегральной кривой (РИК) стока Волги. Расхождения в ходе кривых уровня и РИК, начиная с середины 1990-х годов, обусловлены,

вероятно, демпфирующим влиянием оттока воды в залив Кара-Богаз-Гол после разрушения дамбы (Водный ..., 2016), тем не менее общие тенденции сходны. Увеличившееся испарение, связанное с повышением температуры воздуха, на фоне маловодья приводит к более высокой скорости снижения уровня, что согласуется с выводами А.В. Фролова (2016). К 2023 г. отметка среднего уровня достигла -28.7 м относительно нуля Балтийской системы, что почти на 2 м меньше по сравнению с отметкой 1995 г. При этом темпы падения уровня в последние три года составляют около 20 см в год.

Ряд авторов (Водный ..., 2016; Chen et al., 2017; Elguindi and Giorgi, 2006; Nandini-Weiss et al., 2020; Prange et al., 2020) видят главную причину многолетних колебаний уровня Каспийского моря в изменчивости климатообразующих факторов (солнечной активности, циркуляции атмосферы и др.), влияющих на формирование элементов водного баланса и приводящих к непостоянству соотношений между отдельными его составляющими. Изменчивость климатообразующих факторов обуславливает циклические изменения объема вод моря и соответствующие им циклические колебания уровня различной продолжитель-

Таблица 3. Многолетние изменения суммарного речного стока в Каспийское море, км³

Период	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Россия (Волга, Терек, Сулак)													
1961–1990	15.44	14.96	17.95	19.00	46.21	32.05	18.02	15.91	14.38	15.13	15.32	16.92	240.69
1991–2000	15.79	15.48	18.85	24.84	54.67	37.45	21.54	19.12	17.02	16.48	16.10	16.21	272.91
2001–2010	16.89	16.42	19.27	22.46	50.13	33.88	19.62	17.20	15.36	14.90	14.31	16.77	256.12
2011–2020	16.06	15.12	17.64	21.11	48.59	28.65	19.97	16.44	14.44	14.42	14.43	17.89	244.12
Δ*	0.62	0.15	−0.31	2.11	2.38	−3.40	1.95	0.53	0.06	−0.71	−0.89	0.98	3.44
Казахстан (Урал)													
1961–1990	0.20	0.18	0.24	1.18	2.44	1.46	0.60	0.37	0.29	0.30	0.30	0.23	7.77
1991–2000	0.29	0.26	0.34	1.11	2.54	1.83	0.81	0.55	0.41	0.39	0.36	0.28	9.13
2001–2010	0.25	0.23	0.31	1.03	1.81	1.51	0.67	0.40	0.29	0.27	0.27	0.23	7.27
2011–2020	0.23	0.23	0.26	1.05	1.82	1.04	0.54	0.37	0.31	0.33	0.32	0.27	6.75
Δ*	0.03	0.05	0.02	−0.13	−0.62	−0.42	−0.06	0.00	0.01	0.03	0.02	0.05	−1.02
Иран (Севидруд, Хараз, Чалус, Полруд)													
1961–1990	0.33	0.32	0.64	0.85	0.89	0.39	0.25	0.31	0.30	0.35	0.35	0.37	4.98
1991–2000	0.43	0.34	0.56	0.90	0.83	0.40	0.25	0.25	0.35	0.38	0.54	0.50	5.74
2001–2010	0.19	0.24	0.35	0.62	0.56	0.28	0.24	0.19	0.11	0.17	0.25	0.25	3.47
2011–2020	0.14	0.21	0.31	0.43	0.35	0.22	0.18	0.12	0.11	0.23	0.28	0.19	2.77
Δ*	−0.19	−0.11	−0.33	−0.42	−0.54	−0.17	−0.07	−0.19	−0.19	−0.13	−0.07	−0.18	−2.21
Азербайджан (Кура)													
1961–1990	1.38	1.29	1.42	1.56	1.89	1.46	0.90	0.79	0.81	0.90	0.98	1.26	14.66
1991–2000	1.26	1.19	1.47	1.48	1.36	1.21	0.88	0.77	0.77	0.91	1.06	1.25	13.65
2001–2010	1.41	1.17	1.20	1.43	1.99	1.33	0.85	0.75	0.74	0.88	1.07	1.17	14.11
2011–2020	0.84	0.77	0.81	0.69	0.74	0.61	0.45	0.44	0.50	0.57	0.66	0.80	7.91
Δ*	−0.53	−0.52	−0.60	−0.87	−1.15	−0.86	−0.45	−0.35	−0.31	−0.33	−0.32	−0.45	−6.75

Примечание. Δ^* – разница между значениями за 1961–1990 гг. и значениями за 2011–2020 гг.

ности: от двух–трехлетних до квазивековых. Эти колебания носят нерегулярный характер и трудно предсказуемы (Фролов, 2016).

Даже небольшие изменения уровня моря приводят к значительным затоплениям или осушениям прибрежных территорий. Начавшееся после 1995 г. и продолжающееся по настоящее время снижение уровня уже к 2021 г. привело к осушению территории в северной части Каспийского моря суммарной площадью около 20573 км² [оценка сделана на основе расчета водного баланса по формулам, приведенным в монографии (Водный ..., 2016)]. Изменилась конфигурация береговой линии. В результате отступления моря были осушены значительные пространства дна прибрежного участка моря – более чем 50 км шириной. Площадь поверхности северной части Каспийского моря при этом изменялась от 106983 км² в 1995 г. до 86450 км² в 2021 г. На картосхеме (рис. 6), построенной для разных отметок среднего уровня Каспийского моря от –28.0 до –31.0 м БС, показано,

что наибольшим изменениям при колебаниях уровня подвергается береговая линия в северо-восточной, наиболее мелководной части моря. По мере дальнейшего снижения уровня, будут подниматься из воды затопленные ныне банки, северная часть будет мелеть и уменьшаться в размерах. Некоторые исследователи считают, что падение уровня продолжится до конца текущего столетия и достигнет 9 м (Elguindi and Giorgi, 2006) или 18 м (Prange et al., 2020), что приведет к практически полному осушению северной части моря. Другие полагают (Борисов и др., 2019), что падение уровня не будет столь катастрофичным, достигнет примерно отметки –31.0 м БС к 2045 г., после чего уровень начнет повышаться. В палео-времени такие смены трансгрессии и регрессии моря отмечаются неоднократно (Свиточ, 2015, 2016; Leroy et al., 2022), и вероятнее всего продолжатся и в будущем.

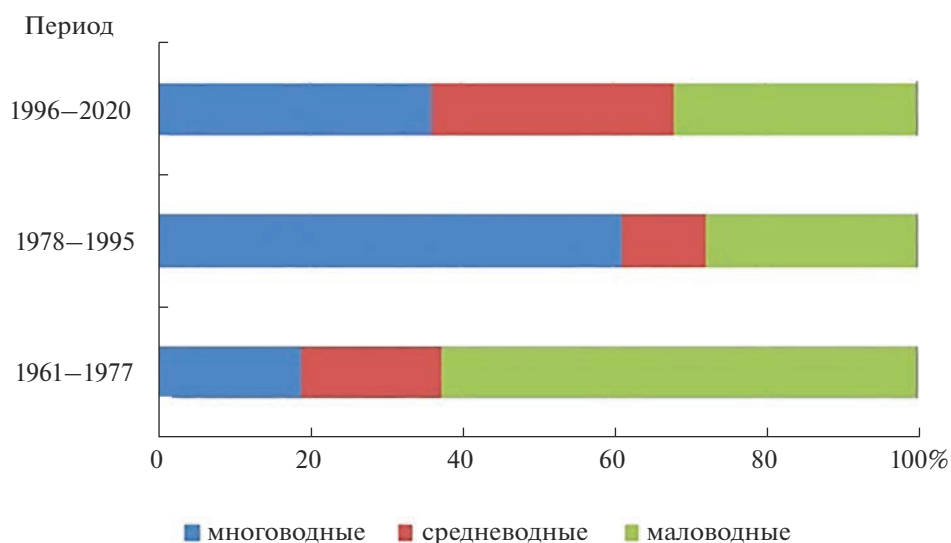


Рис. 4. Изменения в структуре водности р. Волги в разные периоды с 1961 по 2020 г.

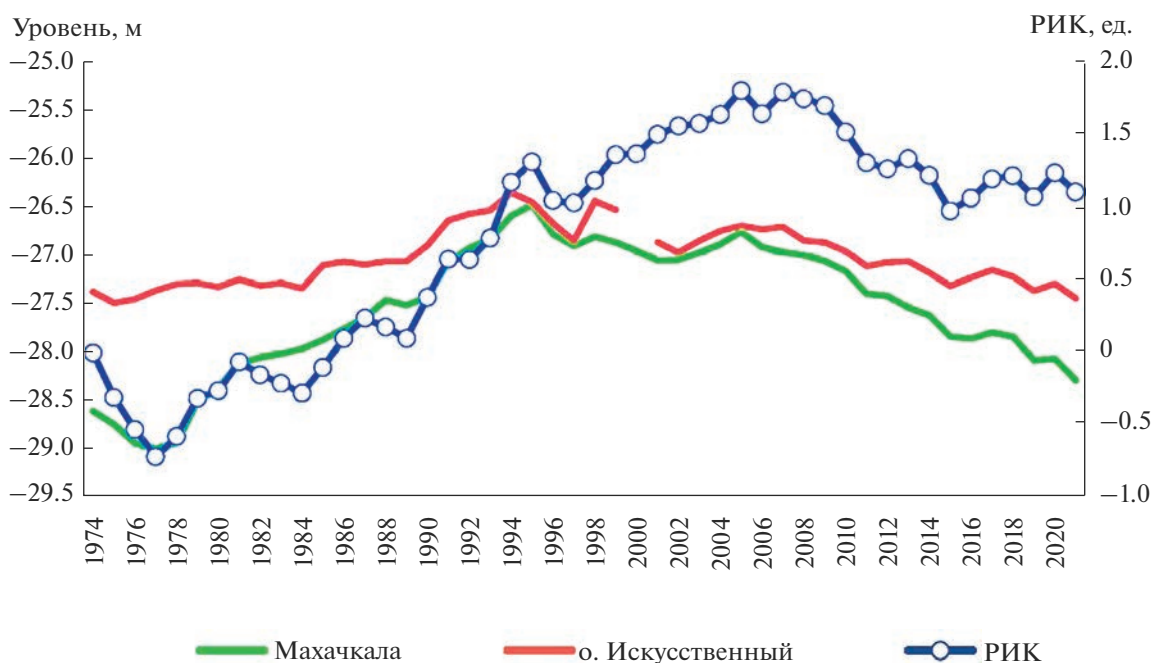


Рис. 5. Уровень моря (на станциях Махачкала, о. Искусственный) и разностно-интегральная кривая (РИК) стока Волги (с. Верхнее Лебяжье) в 1974–2021 гг.

Ветер и сгонно-нагонные явления

В целом для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов характерны такие опасные явления, как сильный ветер, осадки, экстремальные температуры, град (Глобальное ..., 2021). Прикаспийские регионы России (Астраханская область, Республики Дагестан и Калмыкия) являются относительно благополучными по гидрометеорологическим опасным явлениям (Гидрометеорологические ..., 2001).

Для Прикаспия характерны сильные ветры, с максимальными скоростями в диапазоне 25–34 м/с, повторяемость скорости ветра более 25 м/с составляет 5–10 случаев за 10 лет. Сильные ливни (с выпадением 50–100 мм в сутки) отмечаются только в южной части Дагестана, повторяемость сильных дождей (от 50 мм в сутки) для территории Калмыкии и Дагестана составляет 5–10 случаев за 10 лет. Общая частота опасных явлений составила 15 случаев за 10 лет в Дагестане.

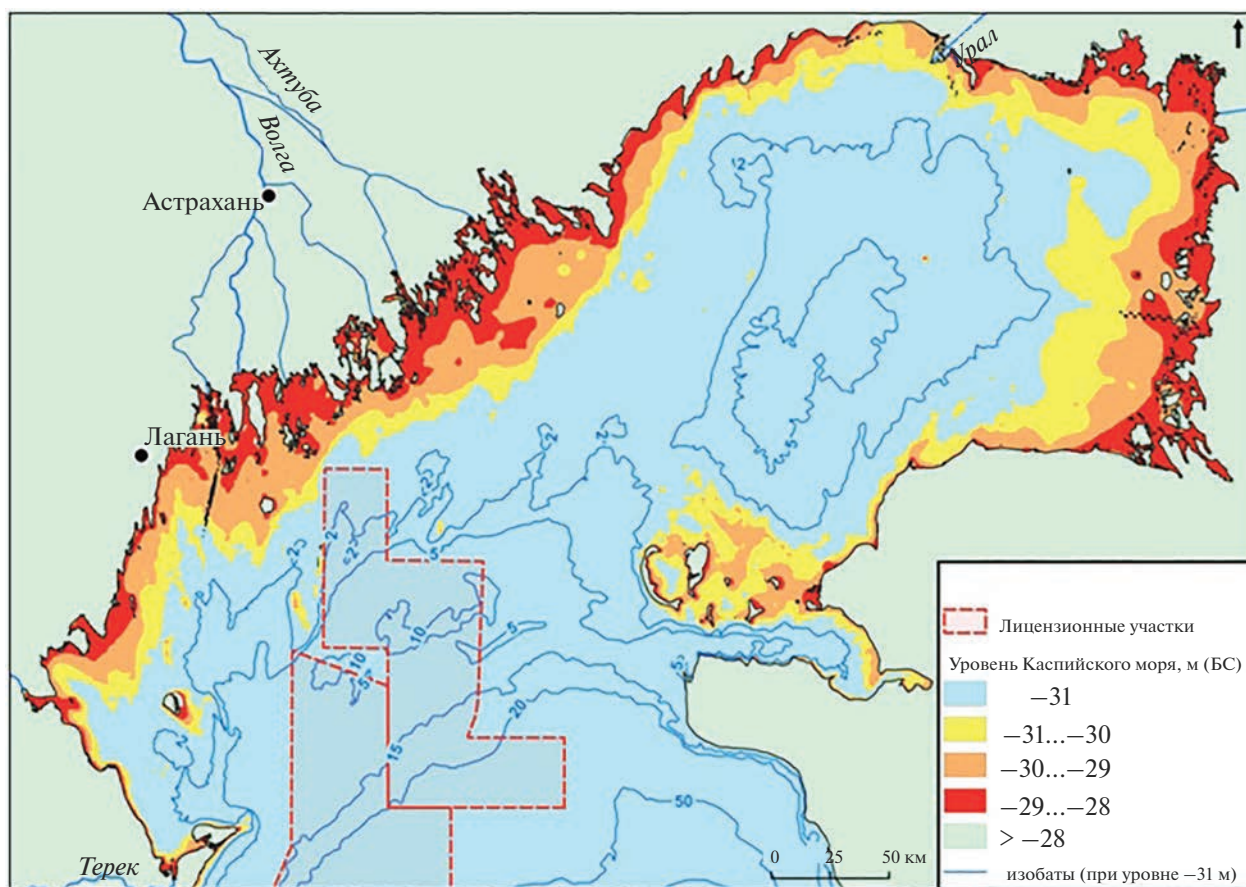


Рис. 6. Возможные изменения береговой линии северной части Каспийского моря в диапазоне уровня от -28.0 до -31.0 м (БС).

не, в то время как в Астраханской области и Калмыкии этот показатель минимален по сравнению со средним по России (Глобальное ..., 2021).

В настоящее время отмечаются определенные изменения ветрового режима на открытой акватории моря, для анализа которых использовались данные на морской станции о. Тюлений.

Как и в предыдущий 30-летний период (1961–1990 гг.), в северо-западной части Каспийского моря в последнее десятилетие (2010–2021 гг.) и в годовом распределении, и по сезонам преобладают ветры восточных румбов (в основном это В и ЮВ ветры), повторяемость которых составляет около 25%. Однако наблюдается увеличение среднемесячной и среднегодовой скорости ветра за последние 30 лет относительно стандартного опорного периода (1961–1990 гг.). Максимальное среднемесячное отклонение от нормы в сторону увеличения скорости ветра достигает 1.2 м/с и среднегодовое – 0.8 м/с. Статистически значимые положительные приращения отмечаются практически по всем месяцам года, за исключением января и февраля. При этом 50% повторяемостью отличаются ветры со скоростью от 6 до 13 м/с, в то

же время наблюдается снижение максимальных скоростей ветра. Так, скорость ветра 25 м/с и более часто наблюдалась в период 1999–2008 гг., а начиная с 2009 г. ветры со скоростью 25 м/с отмечались лишь в 2013 и 2015 гг.

В российской части Каспийского моря ветры юго-восточного и восточного направлений с повторяемостью в среднем за исследуемый период соответственно 25.0 и 22.6%, вызывают нагоны, а западные и северо-западные ветры с повторяемостью 10.4 и 15.4% – сгоны. Наибольший материальный и экологический ущерб в прибрежной зоне наносят катастрофические штормовые нагоны, которые могут распространяться вглубь территории на десятки км в течение нескольких часов (Нестеров и др., 2018).

Сезонное распределение сгонно-нагонных колебаний исследовалось за период 2010–2021 гг. В этот период по сравнению с периодом 2003–2017 гг. среднее количество нагонов снизилось (на примере станции о. Тюлений) (рис. 7).

Всего в 2010–2021 гг. наблюдалось 400 случаев сгона и 442 нагона (табл. 4). За это время в Лагани наблюдались 23 сильных (более 1 м) нагона и

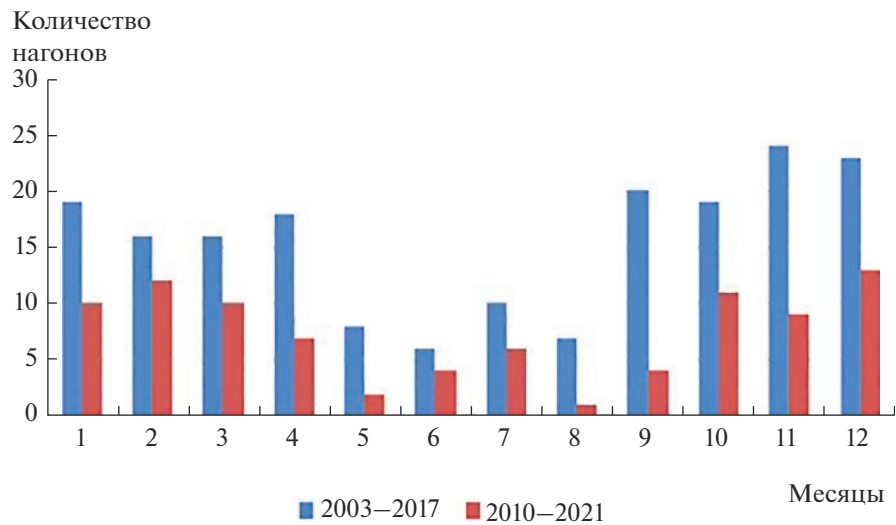


Рис. 7. Среднее количество нагонов в Северном Каспии (о. Тюлений) в 2010–2021 гг. по сравнению с 2003–2017 гг. *Источник данных за 2003–2017 гг.: (Нестеров и др., 2018).*

5 сгонов, в то время как на о-вах Тюлений и Искусственный — по 1 нагону. Средняя высота наибольших за год нагонов по данным Лагани за 2010–2021 гг. составила 125 см, максимальная (229 см) отмечалась 30 марта 2015 г.

В соответствии с характером ветров максимальное число сгонно-нагонных колебаний уровня, по данным станций о. Тюлений и Махачкала, приходится на зимний период (ноябрь–февраль), а минимальное — на летний (с июня по август), что согласуется с данными (Нестеров и др., 2018) (рис. 8). На о. Тюлений преобладают нагоны, их максимум приходится на октябрь–март, максимальная продолжительность достигала шести дней (23–28.02.2011 г. и 16–21.11.2020 г.). Сгоны здесь чаще всего наблюдаются с октября по февраль, продолжительность сгонов в среднем составила 1–3 дня.

На о. Искусственный максимум сгонов и нагонов приходится на весну. Преобладают нагоны, максимум наблюдается в марте, апреле. Максимальная продолжительность составила четыре дня (20–23.11.2013 г.).

В Лагани максимум сгонов отмечается весной, а максимум нагонов — осенью, общее количество сгонно-нагонных явлений летом и осенью одинаковое. Преобладают сгоны, максимум сгонов наблюдается в марте, апреле, октябре и в декабре, продолжительность сгонов в среднем составила 1–5 дней, максимальная продолжительность достигала 9 дней (06–14.11.2020 г.). Наибольшее число нагонов наблюдается в период с сентября по апрель, максимальная продолжительность достигала 7 дней (03–09.09.2018 г., 16–22.11.2020 г., 02–08.10.2021 г.).

Анализ сгонно-нагонных явлений показывает, что средняя продолжительность нагонов составляет 1–4 дня, продолжительность сгонов воды изменяется от одного дня до нескольких суток. Чаще всего наблюдаются сгонно-нагонные явления продолжительностью 1–2 дня (табл. 5).

Наибольшую повторяемость имели нагоны в интервале 30–50 см. Наибольшей величины сгон-

Таблица 4. Количество сгонов и нагонов, наблюдаемых на станциях в российской части Каспийского моря, 2010–2021 гг.

Показа- тель	Месяц												Σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
о. Искусственный													
Нагоны	2	1	7	8	1	2	1	0	1	3	2	4	32
Сгоны	0	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5
Σ	2	3	8	9	2	2	1	0	1	3	2	4	37
Лагань													
Нагоны	29	22	31	29	22	21	13	16	29	27	34	27	300
Сгоны	24	25	36	35	29	17	20	13	25	34	31	36	325
Σ	53	47	67	64	51	38	33	29	54	61	65	63	625
о. Тюлений													
Нагоны	10	12	10	7	2	4	6	1	4	11	9	13	89
Сгоны	6	5	4	3	1	1	0	2	2	6	5	9	44
Σ	16	17	14	10	3	5	6	3	6	17	14	22	133
Махачкала													
Нагоны	1	4	3	1	0	1	1	1	0	0	4	5	21
Сгоны	4	4	2	3	2	2	1	0	1	1	3	3	26
Σ	5	8	5	4	2	3	2	1	1	1	7	8	47

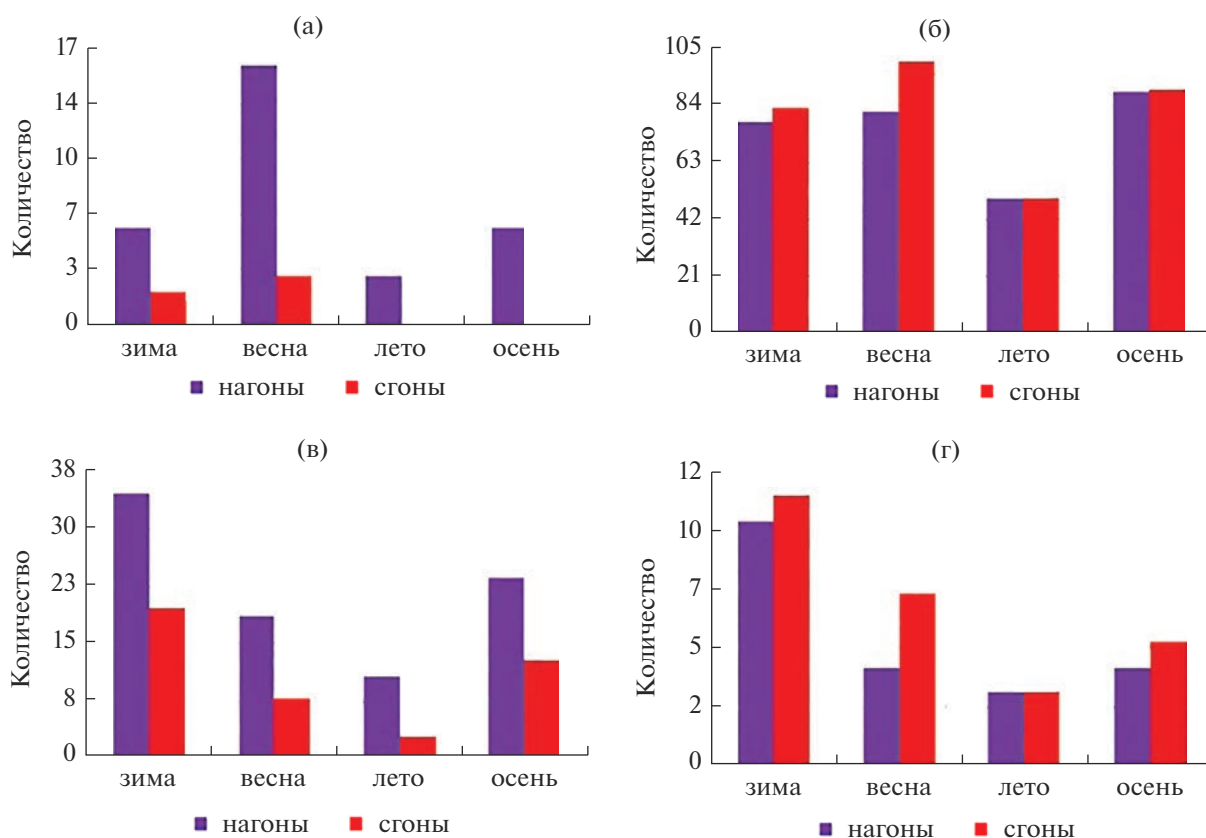


Рис. 8. Сезонная изменчивость сгонно-нагонных явлений по сезонам в среднем за 2010–2021 гг. на станциях: (а) о. Искусственный; (б) Лагань; (в) о. Тюлений; (г) Махачкала.

но-нагонные колебания уровня достигают в районе Лаганы, на нагоны в интервале 51–100 см приходилось 26.1%, на нагоны более 100 см – 4.5%; для сгонов повторяемость составила 33.5 и 1.0% соответственно. Величина нагонов существенно больше, чем сгонов. Сгоны более 100 см не наблюдались. Максимальная величина нагона составила 229 см; максимальная величина сгона составила 120 см. На остальных станциях сильные нагоны и сгоны, превышающие 50 см, наблюдались достаточно редко: доля нагонов в интервале 51–100 см для о. Тюлений составила 7.0%, для Махачкалы и о. Искусственный 0.2 и 2.0%; доля сгонов в интервале 51–100 см составила 0.5% на о. Тюлений от общего числа всех зарегистри-

рованных случаев. По сравнению с периодом высокого стояния уровня Каспийского моря, в современный период снижения уровня высота нагонов снижается, что соответствует выводам (Водный ..., 2016).

Основными синоптическими ситуациями, приводящими к значительным нагонам (более 1 м), в исследуемый период были отроги и гребни азиатского антициклона (78.5%), нагоны циклонического происхождения более редки (11.4%), нагоны, возникающие под влиянием скандинавских антициклонов, составили 6.3%, карских антициклонов – 3.8%. Влияние сильных западных, северо-западных и юго-западных ветров, вызывающих сгоны, было обусловлено воздействием греб-

Таблица 5. Продолжительность нагонных и сгонных явлений в северо-западной части Каспийского моря, 2010–2021 гг.

Продолжительность	о. Искусственный		Лагань		о. Тюлений		Махачкала	
	нагон	сгон	нагон	сгон	нагон	сгон	нагон	сгон
1–2 дня	27	5	240	266	73	40	20	26
3–5 дней	5	0	54	58	14	4	1	0
Более 6 дней	0	0	6	1	2	0	0	0

ней и отрогов азорского антициклона (45%), сгоны, вызываемые каспийскими, южными и северо-западными циклонами в сумме составили 54%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты анализа данных многолетних наблюдений за отдельными гидрометеорологическими показателями состояния окружающей среды в регионе Каспийского моря, выполненного с целью оценки их изменчивости в современный период. Анализ многолетних рядов температуры приземного слоя воздуха на станциях наблюдательной сети в регионе Каспийского моря показывает повышение ее среднегодовой величины в последний 30-летний период на 1.0°C в сравнении с базовым климатическим периодом, что совпадает и с другими исследованиями (Третий ..., 2022; Торопов и др., 2018). Наиболее существенное увеличение температуры воздуха пришлось на зимние месяцы. Максимальные значения температуры, наблюдаемые в современный период, также увеличились относительно базового периода. Наиболее существенное увеличение максимальных значений пришлось на осень. Значения минимальных температур воздуха в современный период снизились. Наиболее существенное снижение значений минимальных температур пришлось на осень. Для весны было отмечено увеличение значений минимальных температур. Наиболее существенное повышение среднегодовой температуры воздуха относительно базового климатического периода наблюдалось на станциях в Среднем Каспии по сравнению с другими районами моря. В северной части моря наиболее интенсивно температура воздуха повышалась зимой, а в южной — летом. На фоне потепления росла и температура поверхностного слоя воды. Средняя годовая температура воды Каспийского моря в последние 30 лет относительно базового периода увеличилась на 0.3°C . Наиболее существенное увеличение средних значений отмечается в осенние месяцы. Наиболее существенное повышение температуры произошло в Южном Каспии. Менее всего менялась температура воды в Среднем Каспии. Наибольшее повышение температуры воды в Северном Каспии приходилось на осенние и зимние месяцы.

В настоящее время суммарный речной сток в море составляет около 275 км^3 , 80% которых приходится на Волгу. По всем рекам, впадающим в Каспийское море, в период 1996–2018 относительно периода 1961–1990 гг. наблюдается уменьшение объема стока. Интенсивность снижения объемов речного стока за период 1996–2018 гг. в среднем составила 0.12 км^3 в год, при этом наиболее интенсивное снижение стока было зафиксировано для Волги и Куры, причем для первой это

было обусловлено природными факторами, а для второй — антропогенным изъятием. По сравнению с предшествующим периодом отмечаются изменения в структуре водности Волги, маловодье на Волге теперь наблюдается чаще, хотя и не так часто, как это было в маловодный период 1961–1977 гг. В условиях нарастающего маловодья и повышенных температур воздуха, приводящих к повышенному испарению, тенденция к снижению уровня Каспийского моря, наблюдающаяся с конца 1990-х годов, сохраняется. Это позволяет согласиться с выводами авторов (Водный ..., 2016), что современные изменения уровня моря связаны с климатическими изменениями в его бассейне. К 2023 г. отметка среднего уровня достигла -28.7 м относительно нуля Балтийской системы, что почти на 2 м меньше по сравнению с отметкой 1995 г. При этом темпы падения уровня в последние три года составляют около 20 см в год. Осушение прибрежных территорий, связанное с падением уровня, оценено в 22 тыс. км^2 .

Проведенный анализ позволил также выявить определенные изменения ветрового режима и сгонно-нагонных явлений на акватории российской части Каспийского моря. Преобладают в годовом и сезонном распределении, как и ранее, ветры восточных румбов (в основном это восточные и юго-восточные ветры), повторяемость которых составляет около 25%. Наблюдается увеличение среднемесячной и среднегодовой скорости ветра относительно стандартного опорного периода (1961–1990 гг.). Максимальное среднемесячное отклонение от нормы в сторону увеличения скорости ветра достигает 1.2 м/с и среднегодовое — 0.8 м/с. Статистически значимые положительные приращения отмечаются практически по всем месяцам года, за исключением января и февраля. Восточные ветры в западной части моря вызывают разрушительные штормовые нагоны. Анализ сезонного распределения сгонно-нагонных колебаний за период 2010–2021 гг. показал заметное снижение количества нагонов и их амплитуды, что, вероятно, связано с более низкими отметками уровня (Нестеров и др., 2018).

В заключение отметим, что прогнозы, основанные на моделях МГЭИК, показывают, что описанные тенденции климатических изменений будут продолжаться (Третий ..., 2022) и, следовательно, в ближайшие 10–15 лет естественные изменения гидрометеорологических условий на Каспии будут происходить на фоне повышенной температуры воздуха. Некоторые работы (Chen et al., 2017; Prange et al., 2020) прогнозируют практически полное осушение северной части Каспийского моря из-за продолжающейся регрессии уровня к концу этого столетия. В этой связи гидрометеорологические, гидрографические и геоморфологические исследования на Каспии и устьевых областях впадающих в него рек будут чрезвычайно ак-

туальны для обеспечения безопасности морской и прибрежной инфраструктуры, судоходства и социально-экономического развития региона в целом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность своим коллегам Дегтяревой Л.В. и Светашевой Д.Р. за подготовку рукописи статьи к печати.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to their colleagues L.V. Degtyareva and D.R. Svetasheva for preparing this paper for publication.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов Е.В., Ермаков В.Б., Мельников В.А.* Анализ периодической структуры климатических колебаний уровня Каспийского моря // Процессы в геосредах. 2019. № 2. С. 146–152.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / под ред. Е.С. Нестерова. М.: Триада Лтд, 2016. 374 с.
- Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г.* Пространственно-временные изменения характеристик экстремального стока рек бассейна Волги // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 8–16.
- Гидрометеорологические опасности / под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. М.: КРУК, 2001. Т. 5. 295 с.
- Глобальное изменение климата и Южный федеральный округ. На пути к адаптации. Климатический центр Росгидромета. СПб.: Научные технологии, 2021. 12 с.
- Катунин Д.Н.* Гидроэкологические основы формирования экосистемных процессов в Каспийском море и дельте реки Волги. Астрахань: КаспНИРХ, 2014. 478 с.
- Курапов А.А., Островская Е.В., Даурова Д.С., Васильева Т.В.* Влияние изменений климата на биологические сообщества Северного Каспия / отв. ред. А.Ф. Соколовский. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2020. 265 с.
- Леонтьев О.К., Маев Е.Г., Рычагов Г.И.* Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 210 с.
- Лобанов В.А., Наурузбаева Ж.К.* Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия: Монография. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с.
- Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / науч. ред. С.М. Семенов. М.: Росгидромет, 2012. 510 с.
- Нестеров Е.С., Попов С.К., Лобов А.Л.* Статистика и моделирование штормовых нагонов в Северном Каспии // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 53–59.
- Обедиентова Г.В.* Эрозионные циклы и формирование долины Волги. М.: Наука, 1977. 239 с.
- Проблемы загрязнения устьевой области Волги / отв. ред. Е.В. Островская. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2021. 328 с.
- Рычагов Г.И., Коротаев В.Н., Чернов А.В.* История формирования палеодельты Нижней Волги // Геоморфология. 2010. № 3. С. 73–81.
- Свиточ А.А.* Палеогеография Большого Каспия // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2015. № 4. С. 69–80.
- Свиточ А.А.* Регрессивные эпохи большого Каспия // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 134–148.
- Сиднев А.В.* История развития гидрографической сети плиоцена в Предуралье. М.: Наука, 1985. 224 с.
- Торопов П.А., Алешина М.А., Семенов В.А.* Тенденции изменений климата Черноморско-Каспийского региона за последние 30 лет // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2018. № 2. С. 67–77.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. Росгидромет. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.
- Фролов А.В.* Моделирование влияния оттока в залив Кара-Богаз-Гол на плотность распределения вероятности уровня Каспийского моря // Математическое моделирование и численные методы. 2016. № 3 (11). С. 79–92.
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S.* Long-term Caspian Sea level change // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. P. 6993–7001. <https://doi.org/10.1002/2017GL073958>
- Elguindi N., Giorgi F.* Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. Article L08706. <https://doi.org/10.1029/2006GL025943>
- Lahijani H.A.K., Azizpour J., Arpe K., Abtahi B., et al.* Tracking of sea level impact on Caspian Ramsar sites and potential restoration of the Gorgan Bay on the southeast Caspian coast // Science of The Total Environ. 2023a. Vol. 857. Part 1. Article 158833.
- Lahijani H., Leroy S.A.G., Arpe K., Cretaux J.-F.* Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review // Earth-Science Reviews. 2023b. Vol. 241. Article 104428.
- Lattuada M., Albrecht C., Wilke T.* Differential impact of anthropogenic pressures on Caspian Sea ecoregions // Mar. Poll. Bull. 2019. Vol. 142. P. 274–281.
- Leroy S.A.G., Reimer P.J., Lahijani H.K., Naderi Beni A., Sauer E., Chali'e F., Arpe K., Demory F., Mertens K., Belkacem D., Kakroodi A.A., Omrani Rekavandi H., Nokandeh J., Amini A.* Caspian Sea levels over the last 2200 years, with new data from the S-E corner // Geomorphology. 2022. Vol. 403. Article 108136.
- Nandini-Weiss Sri D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M.* Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // Int. J. of Climatology. 2020. Vol. 40. P. 2717–2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>
- Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P.* The other side of sea level change // Commun Earth Environ. 2020. Vol. 1 (69). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>

Hydrometeorological Parameters of the Marine Environment in the Russian Sector of the Caspian Sea under Changing Climate

E. V. Ostrovskaya¹*, E. V. Gavrilova¹, I. V. Gontovaya¹, V. O. Tatarnikov¹, and M. A. Ocheretnyi¹

¹Caspian Marine Scientific Research Center, Astrakhan, Russia

*e-mail: eostrovskaya@mail.ru

The paper summarizes the data from long-term observations of hydrometeorological parameters in the Caspian macro-region. The average annual air temperature over the past 30 years at stations in the Russian part of the Caspian Sea has increased by 1.0°C and the temperature of the surface water layer by 0.3°C. Currently, the total river runoff into the sea is about 275 km³. The volume of annual runoff from all rivers flowing into the Caspian Sea went down in the 1996–2020 period compared to the 1961–1990 period. The intensity of the decrease in river runoff in the 1996–2020 period averaged 0.12 km³ per year, while the flow of the Volga and Kura rivers decreased most intensively. In conditions of warming and decreasing river runoff, the Caspian Sea level continues to decline, which began in the late 1990s. Due to increasing water scarcity in the Volga River, the level of the Caspian Sea is going down. The trend started in the late 1990s. By the beginning of 2023, the average sea level had reached –28.70 m abs, which is about 2 m lower compared to the level in 1995. The drained coastal territories are assessed at more than 22 thous. km², mainly in the northern shallowest part of the sea. The changes in the wind regime and the observed increase in the average monthly and yearly wind speeds are compared against those in the standard reference period (1961–1990). It has been established that the easterly and westerly winds, which cause storm surges with devastating impact on coastal territories, have the greatest repeatability. The statistics of surges observed at four marine stations are given for the 2010–2021 period. The amplitude of the wind-induced level fluctuations in the Lagan area reaches a maximum value of 3.0–3.5 m, while it is about 1 m in Makhachkala. An analysis of the seasonal variability of surges is also given.

Keywords: Caspian Sea, Volga River, climate change, air temperature, water temperature, sea level, river flow, wind, storm surge

REFERENCES

- Borisov E.V., Ermakov V.B., Mel'nikov V.A. Analysis of the periodical structure of the climatic variations of the Caspian Sea level. *Prots. Geosredakh*, 2019, no. 2, pp. 146–152. (In Russ.).
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, pp. 6993–7001.
<https://doi.org/10.1002/2017GL073958>
- Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, article L08706.
<https://doi.org/10.1029/2006GL025943>
- Frolov A.V. Modeling the effect of outflow into the Karabogaz-Gol Bay on the probability distribution density of the Caspian Sea level. *Matem. Modelir. Chisl. Metody*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 79–92. (In Russ.).
- Georgievskii V.Yu., Grek E.A., Grek E.N., Lobanova A.G., Molchanova T.G. Spatiotemporal Changes in Extreme Runoff Characteristics for the Volga Basin Rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 633–638.
<https://doi.org/10.3103/S1068373918100011>
- Gidrometeorologicheskie opasnosti. T. 5 [Hydrometeorological Threats. Vol. 5]*. Golitsyn G.S., Vasil'ev A.A., Eds. Moscow: KRUK Publ., 2001. 295 p.
- Global'noe izmenenie klimata i Yuzhnyi federal'nyi okrug. Na puti k adaptatsii [Global Climate Change and South Federal District. A Way to Adaptation]*. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii Publ., 2021. 12 p.
- Katunin D.N. *Gidroekologicheskie osnovy formirovaniya ekosistemnykh protsessov v Kaspiiskom more i del'te reki Volgi [Hydroecology Shaping the Ecosystem Processes in the Caspian Sea and the Volga River Delta]*. Astrakhan': KaspNIRH Publ., 2014. 478 p.
- Kurapov A.A., Ostrovskaya E.V., Dairova D.S., Vasil'eva T.V. *Vliyanie izmenenii klimata na biologicheskie soobshchestva Severnogo Kaspiya [Climate Change Impact on Biological Communities of the Northern Caspian]*. Sokol'skii A.F., Ed. Astrakhan': Sorokin R.V. Publ., 2020. 265 p.
- Lahijani H., Azizpour J., Arpe K., Abtahi B., Rahnema R., Ghafarian P., Ali Hamzeh M., Hamzehpour A., Mohammadpour Penchah M., Masoud Mahmoudof S. Tracking of sea level impact on Caspian Ramsar sites and potential restoration of the Gorgan Bay on the southeast Caspian coast. *Sci. Total Environ.*, 2023a, vol. 857, part 1, article 158833.
- Lahijani H., Leroy S.A.G., Arpe K., Cretaux J.-F. Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review. *Earth-Sci. Rev.*, 2023b, vol. 241, article 104428.
- Lattuada M., Albrecht C., Wilke T. Differential impact of anthropogenic pressures on Caspian Sea ecoregions. *Mar. Poll. Bull.*, 2019, vol. 142, pp. 274–281.
- Leont'ev O.K., Maev E.G., Rychagov G.I. *Geomorfologiya beregov i dna Kaspiiskogo morya [Geomorphology of the Coast and Bottom of the Caspian Sea]*. Moscow: MSU Publ., 1977. 210 p.
- Leroy S.A.G., Reimer P.J., Lahijani H.K., Naderi Beni A., Sauer E., Chali'e F., Arpe K., Demory F., Mertens K., Belkacem D., Kakroodi A.A., Omrani Rekavandi H.,

- Nokandeh J., Amini A. Caspian Sea levels over the last 2200 years, with new data from the S-E corner. *Geomorphology*, 2022, vol. 403, article 108136.
- Lobanov V.A., Naurozbaeva Zh.K. *Vliyanie izmeneniya klimata na ledovyi rezhim Severnogo Kaspiya* [Climate Change Impact on Ice Regime of the Northern Caspian]. St. Petersburg: RGGMU Publ., 2021. 140 p.
- Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods of the Climate Change Assessment for Physical and Biological Systems]. Semenov S.M., Ed. Moscow: Rosgidromet Publ., 2012. 510 p.
- Nandini-Weiss Sri D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area. *Int. J. Climatol.*, 2020, vol. 40, pp. 2717–2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>
- Nesterov E.S., Popov S.K., Lobov A.L. Statistical Characteristics and Modeling of Storm Surges in the North Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 664–669. <https://doi.org/10.3103/S1068373918100059>
- Obedientova G.V. *Eroziionnye tsikly i formirovanie doliny Volgi* [Erosion Cycles and Valley Shaping of the Volga River]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 239 p.
- Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P. The other side of sea level change. *Commun. Earth Environ.*, 2020, vol. 1, article 69. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>
- Problemy zagryazneniya ust'evoi oblasti Volgi* [Pollution Problems in the Volga Mouth Area]. Ostrovskaya E.V., Ed. Astrakhan': Sorokin R.V. Publ., 2021. 328 p.
- Rychagov G.I., Korotaev V.N., Chernov A.V. Historical review of the Lower Volga paleo-delta shaping. *Geomorfologiya*, 2010, no. 3, pp. 73–81. (In Russ.).
- Sidnev A.V. *Istoriya razvitiya gidrograficheskoi seti pliotsena v Predural'e* [Historical Review of the Pliocene Hydrographic Network in Urals Foothills]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 224 p.
- Svitoch A.A. Paleogeography of the Great Caspian. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2015, no. 4, pp. 69–80. (In Russ.).
- Svitoch A.A. Regressive periods of the Great Caspian. *Water Resour.*, 2016, vol. 43, pp. 270–282. <https://doi.org/10.1134/S0097807816020160>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Semenov V.A. Trends in change of climate in the Black and Caspian Sea region for the last thirty years. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2018, no. 2, pp. 67–77. (In Russ.).
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on the Climate Change and Its Effect on the Russian Federation Territory]. Kattsov V.M., Ed. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii Publ., 2022. 676 p.
- Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* [Water Budget and Level Variations of the Caspian Sea. Modelling and Forecast]. Nesterov E.S., Ed. Moscow: Triada Publ., 2016. 374 p.

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

УДК 551.461.2

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАНТЫ ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

© 2023 г. В. Б. Ермаков*

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

*e-mail: vitalerm@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Рассмотрены различные подходы к исследованию и прогнозу многолетних изменений среднегодового уровня Каспийского моря. В рамках наиболее распространенных методик принято считать, что такого рода оценки возможны только в вероятностном смысле, поскольку главные компоненты водного баланса моря ведут себя случайным образом. Однако для большинства потребителей важна конкретно обозначенная перспектива изменения уровня и обоснование ответа на вопрос: если происходит очередное значительное изменение, то как долго и до какого экстремального значения оно продолжится? По мере накопления данных о динамике параметров атмосферы и океана, в том числе и по результатам космического мониторинга, появляется все больше сообщений о выявлении в их временных рядах мультидекадной повторяемости. На протяжении последних лет неоднократно предпринимались попытки на основе изучения динамики уровня моря выявить внутри его временного ряда циклические компоненты с целью использования их как для описания произошедших ранее резких спадов и подъемов, так и для прогноза подобных изменений в будущем. Анализ данных при этом заключается в поиске таких периодов изменчивости, в рамках которых выполнялись бы требования ограниченности периодического состава и устойчивости компонент, формирующих временной ряд. С помощью специально созданной программной среды проведено исследование ряда, состоящего из исторических и современных данных по наблюдениям за уровнем Каспийского моря в течение последних 230 лет с целью выявления устойчивых периодичностей и построения с их помощью аппроксимирующего полинома. Показано, что на данном временном интервале кроме многовекового тренда присутствуют две явно выраженные квазициклические компоненты. Аппроксимация, сделанная с их использованием, позволяет описать всю предшествующую динамику уровня вплоть до 2021 г. и может быть использована в качестве основы для построения прогнозных оценок.

Ключевые слова: Каспийское море, изменение уровня, анализ временных рядов, мультидекадная осцилляция, аппроксимация многолетнего хода уровня набором гармоник

DOI: 10.31857/S2587556623060067, **EDN:** EGCZBH

ВВЕДЕНИЕ

Вопросу изучения изменения уровня Каспийского моря (УКМ) уделяется большое внимание как с научной точки зрения, так и с целью планирования хозяйственной деятельности. В силу обособленного расположения моря сам ход УКМ является уникальным инструментом, реагирующим на глобальные изменения климата и дающим возможность их длительного отслеживания.

На сегодняшний момент общепринято, что положение уровня моря определяется главным образом изменением параметров его водного баланса: объема стока рек, испарения с поверхности и суммы атмосферных осадков. При этом на долю водосборного бассейна р. Волги приходится не менее

80% суммарного речного стока и около 70% приходной части водного баланса (Рычагов, 2011).

В течение трех последних десятилетий, наряду с традиционными наземными исследованиями уровня, развитие получили спутниковые альтиметрические наблюдения за УКМ (Гинзбург и др., 2021; Chen et al., 2017, 2023). На рис. 1, полученном по данным спутниковых наблюдений, показано, как менялся уровень Каспийского моря в последние годы.

Существующие методы описания и прогнозирования многолетних изменений УКМ можно условно разделить (Водный ..., 2016) на следующие группы: использующие простые формы аппроксимации кривой уровня, например, линейную или степенную зависимость, с целью про-

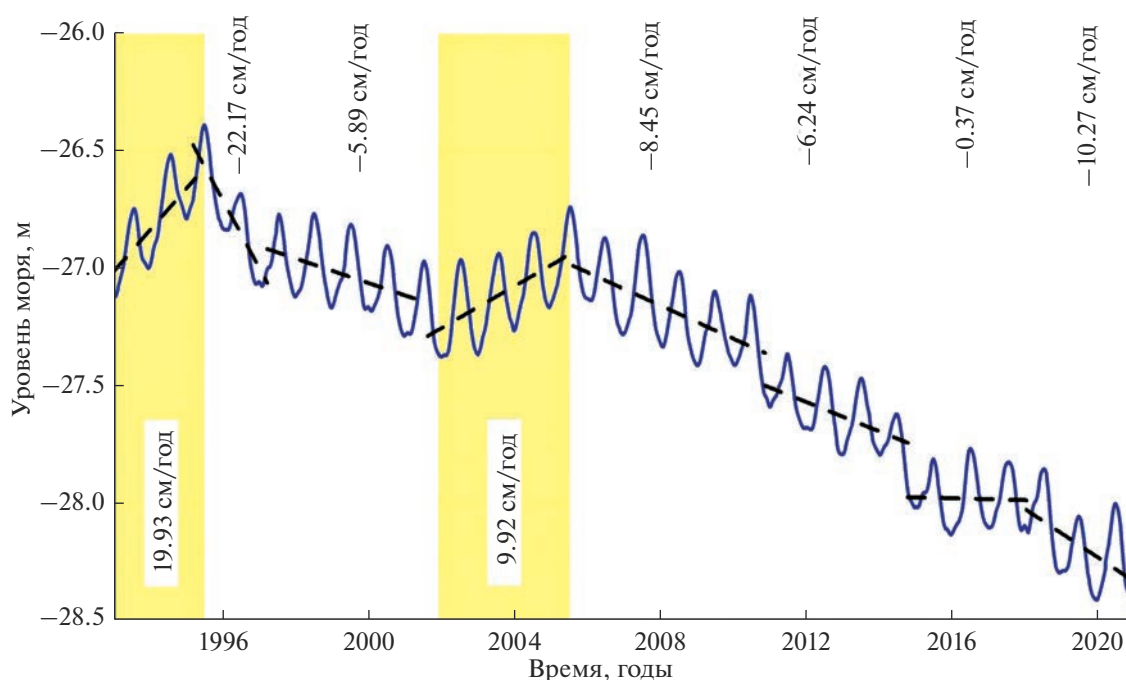


Рис. 1. Динамика уровня Каспийского моря.

Источник: (Гинзбург и др., 2021).

должения ее вперед на некоторый интервал; базирующиеся на поиске и анализе устойчивых периодических компонент во временных рядах УКМ; основанные на вероятностных моделях и применяющие для этого стохастическое уравнение водного баланса; предлагающие разнообразные схемы предикторов, рассматривающие не прямое, запаздывающее влияние различных природных процессов на уровень моря (Малинин, Гордеева, 2020; Никонова, 2008; Тужилкин и др., 2011; Фролов, 2019; Elguindi and Giorgi, 2006).

Два последних подхода, к сожалению, сами требуют прогнозных оценок для входных параметров. Например, могут использоваться наборы сценариев, когда просчитываются отдельно прогнозы для маловодной, средней и многоводной ситуации с водным балансом. Вопрос, какой при этом будет реальная ситуация и сколько она продлится, остается открытым. Кроме того, вероятностные модели дают лишь оценку попадания уровня в некоторый диапазон значений, который с увеличением заблаговременности прогноза на десятилетия вперед может достигать в размахе нескольких метров. Для стратегических оценок катастрофических рисков такие прогнозы вполне оправданы и необходимы. Но для большинства потребителей важна конкретно обозначенная перспектива изменения УКМ и научное обоснование ответа на вопрос — если происходит очередное значительное изменение уровня моря, то

как долго и до какого экстремального значения оно продолжится.

Хотя авторы ряда работ (Болгов, Филимонова, 2005; Болгов и др., 2007) считают, что прогноз многолетних изменений УКМ возможен только в вероятностном смысле, поскольку поведение главных составляющих водного баланса моря на длительных временных масштабах носит, по их мнению, чисто случайный характер, следует отметить, что по мере накопления данных о динамике параметров атмосферы и океана, в том числе и по результатам космического мониторинга, появляется все больше сообщений, например, о выявлении во временных рядах мультideкадной (шестидесятилетней) повторяемости. Подобное отмечалось как в процессе транспорта влаги из Атлантики (Федоров, Фролов, 2019), так и в результирующем эффекте от периодического усиления восточных пустынных ветров в прикаспийском регионе (Выручалкина и др., 2020) (рис. 2). Два последних фактора оказывают существенное влияние на изменение водного баланса в бассейне Каспийского моря.

Нельзя не согласиться с мнением авторов работы (Гусейнова, Абдусаматов, 2015, с. 124) в том, что “в настоящее время нет и, видимо, на современном уровне развития науки не может быть надежных прогнозов, по которым можно предугадать амплитуду и направление изменений уровня Каспия. С учетом этого оправданной может стать рабочая гипотеза о поиске на некотором времен-

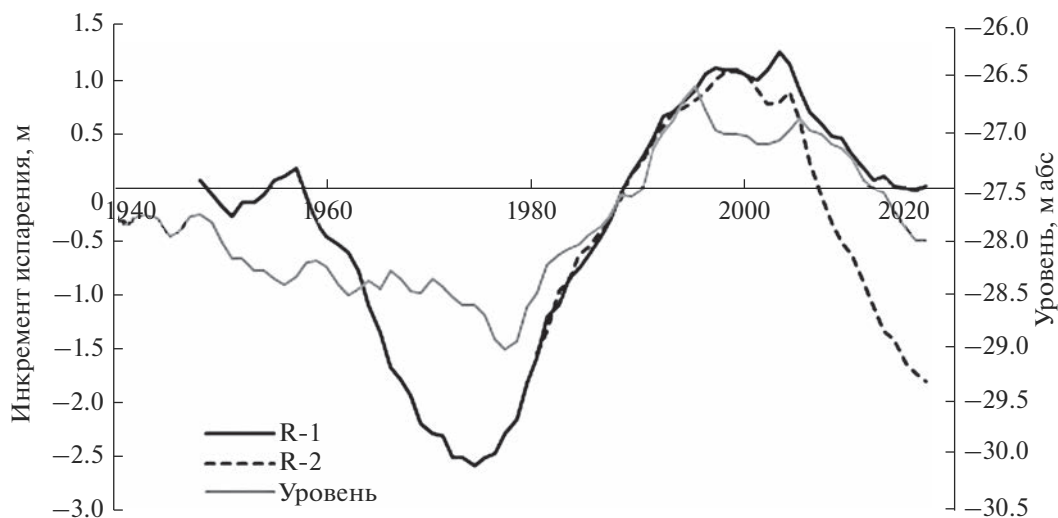


Рис. 2. Эволюция среднегодового испарения в период с 1948 по 2017 г., взятая с обратным знаком вместе с ходом уровня Каспийского моря. В ходе кривых хорошо выражена изменчивость, близкая к шестидесятилетней.
Источник: (Выручалкина и др., 2020).

ном интервале квазициклических компонент в многолетних изменениях уровня моря, основанная на анализе сочетаний различных данных об УКМ (геоморфологических, исторических, наблюдаемых)».

На протяжении последних десятилетий авторами ряда работ неоднократно предпринимались попытки на основе изучения динамики УКМ выявить внутри соответствующего временного ряда циклические компоненты с целью использования их как для описания произошедших ранее резких спадов и подъемов уровня моря, так и для прогноза подобных изменений в будущем (Бабкин, 2005; Борисов и др., 2019; Лаппо, Рева, 1997; Соловьёва, 2004; Шлямин, 1962). Анализ данных при этом заключался в поиске внутри них таких периодов изменчивости, в которых выполнялись бы требования ограниченности периодического состава и устойчивости компонент, формирующих временной ряд. В качестве примера на рис. 3 показан образец вейвлет-спектра, полученный в (Борисов и др., 2019) для исторических данных по УКМ (Берг, 1949), дополненных современными значениями уровня от Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова — ГОИН (Никонова, 2008).

В целом, результат таких попыток нельзя назвать удовлетворительным (Хаустов, Костенко, 2018; Гинзбург и др., 2021). Одной из причин этого, на наш взгляд, было вынужденное использование авторами слишком коротких на момент проведения исследований временных рядов наблюдений за уровнем. Другой причиной, возможно, было включение ими в область анализа не части, а всего массива не совсем точных, так называемых исторических, данных 1506–1836 гг.

(кривая Берга) об уровне моря (Берг, 1949; Варущенко и др., 1987; Рычагов, 2019; Шлямин, 1962), полученных по старинным лоциям, раскопкам и геологическим изысканиям.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

На основе обзора ранее выполненных исследований по анализу динамики среднегодовых значений УКМ рассмотреть возможность дополнения их новыми данными, полученными за последние годы, и провести исследование закономерностей хода уровня. Взяв за основу опубликованные в литературных источниках данные о сделанных в 1837–2021 гг. инструментальных наблюдениях за уровнем моря, рассмотреть одновременно с ними и более ранние, так называемые исторические, данные из диапазона 1506–1836 гг., но не все, а только ту часть, которая примыкает с отдалением не более чем на 50 лет. Выяснить, насколько такой комбинированный 1790–2021 гг. ряд, позволяет провести его аппроксимацию тригонометрическим полиномом с минимальным (не более четырех) количеством гармоник.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведен анализ временных рядов среднегодовых значений УКМ на наличие в них периодических компонент. При этом за условный ноль бралось среднее значение уровня на исследуемом интервале и методом наименьших квадратов осуществлялся поиск оптимальных значений амплитуд, частот и фаз аппроксимирующего тригонометрического полинома по алгоритму, описанно-

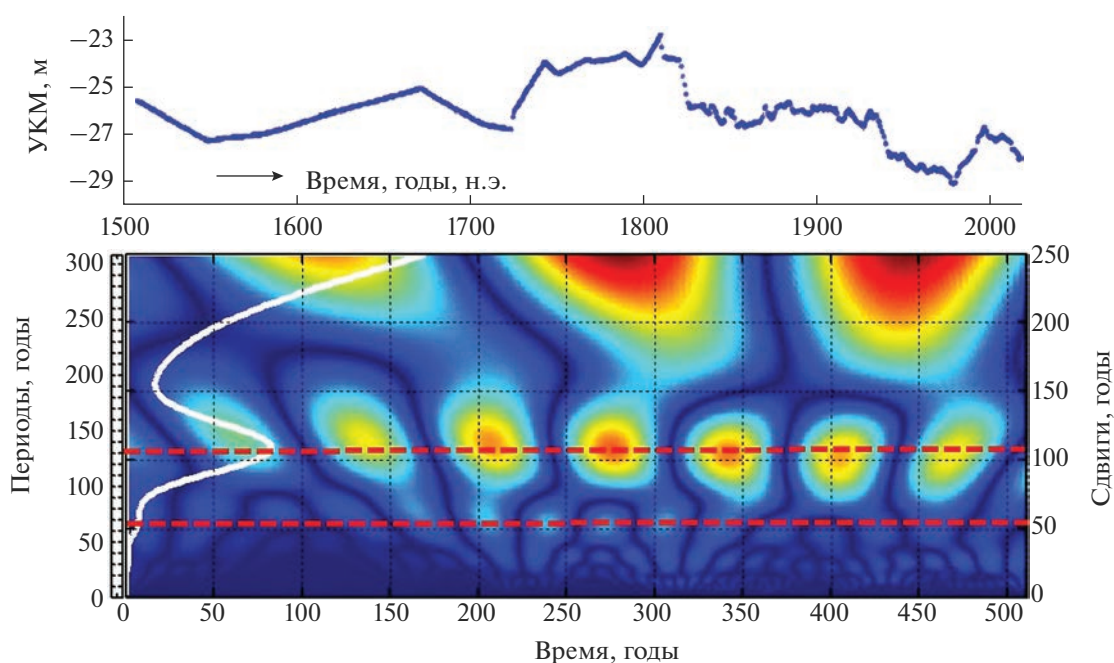


Рис. 3. Кривая многолетних изменений уровня Каспийского моря и результат ее вейвлет анализа.
 Источник: (Борисов и др., 2019).

му в (Бабкин, 2005). Для обработки данных была применена специальная программная среда (Борисов и др., 2019), которая позволяет в реальном масштабе времени, наблюдая за результатом в виде готовых формул и графиков, интерактивно менять параметры моделирования: задавать начало и конец исследуемого интервала, применять различные методы сглаживания, добавлять шум, варьировать параметры вспомогательного анализатора спектра, вести покомпонентный контроль модельного и разностного сигналов.

На рис. 4 показан вид интерфейса программы. Слева от вертикальной оси зеленым цветом показаны исторические и современные данные для УКМ (1506–2021 гг.), соответствующие кривой Берга с дополнениями от ГОИН. Справа показана тем же цветом, но уже только часть данных на выбранном для анализа интервале 1790–2021 гг. Пунктиром красного цвета вдоль хода кривой УКМ обозначена ее аппроксимация в виде суммы двух главных периодичностей и тренда. Аналитическая запись получающейся модели дана справа вверху. Желтой линией обозначен вспомогательный Фурье-спектр, представленный периодограммой. Штриховой синей линией помечен уровень -28 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам анализа временного ряда УКМ в интервале 1790–2021 гг. найдено, что характер его изменения в данной области, помимо тренда,

главным образом (рис. 5) определяется двумя гармониками, имеющими периоды близкие к 67 и 98 годам с соответствующими амплитудами 0.4 и 0.9 м.

На границах анализируемого временного интервала они практически синфазны, а в центре — противофазны, чем определяется характерный, симметричный вид кривых, показанных на рис. 5 справа от вертикальной оси. Эффект от такого сложения двух близких по частоте гармоник проиллюстрирован на рис. 6.

Если принять во внимание разность частот рассматриваемых здесь гармоник, то можно видеть, что интервал биений такого рода составляет величину порядка 200 лет. Это значение, в частности, определяет длину временного отрезка, который необходим для надежного распознавания таких относительно близких по частоте компонент.

Две указанные периодичности, на наш взгляд, играют существенную роль в динамике среднегодового УКМ, по крайней мере в диапазоне последних 230 лет. Возможно, что такое длительное проявление упорядоченности в многолетней динамике УКМ является случайным совпадением и говорить о том, продолжится ли такое поведение уровня в ближайшие или более отдаленные годы, следует с известной осторожностью. Тем не менее факт выявленной закономерности не следует игнорировать, в том числе и в части его возможного физического обоснования. Подобная квазипериодичность в районе 60 лет отмечалась как в связи с мультидекадной повторяемостью транспорта влаги из Атлантики (Федоров, Фролов, 2019), так и в яв-

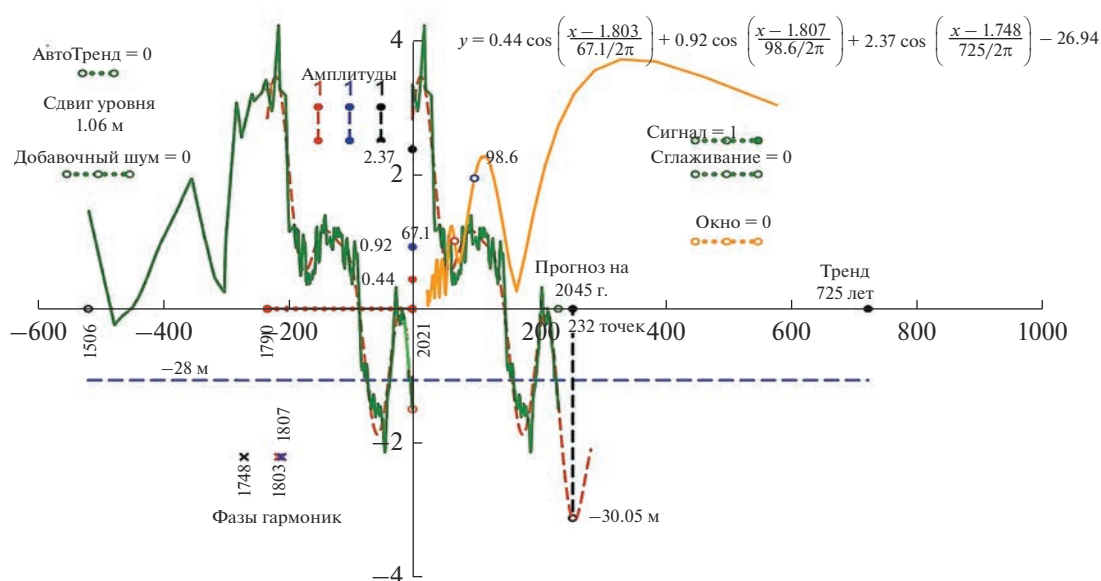


Рис. 4. Элементы управления и вид результатов работы среды моделирования.

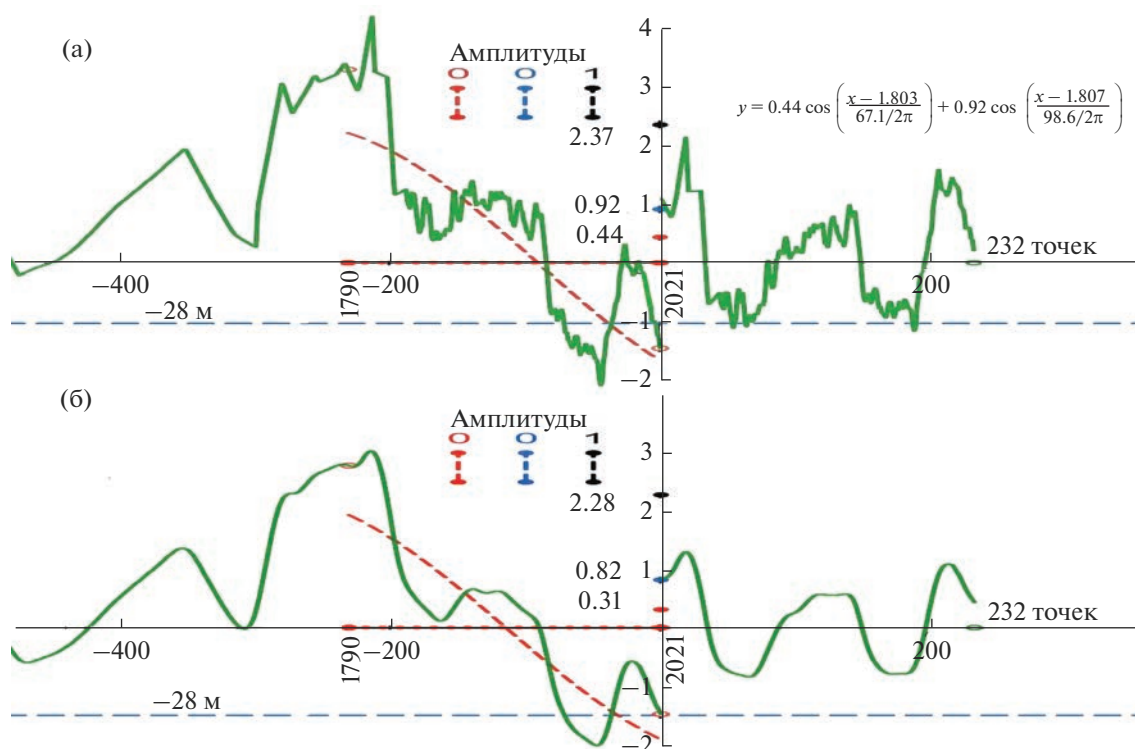


Рис. 5. Эффект от вычитания тренда (красная штриховая линия) для кривой Берга на участке 1790–2021 гг.: (а) без сглаживания и (б) с 16-летним сглаживанием.

лении периодического усиления восточных пустынных ветров (Выручалкина и др., 2020). Что касается компоненты близкой к 90 годам, то она,

в частности, обсуждалась в работе (Соловьёва, 2004) в связи с соответствующим по длительности циклом солнечной активности и климатиче-

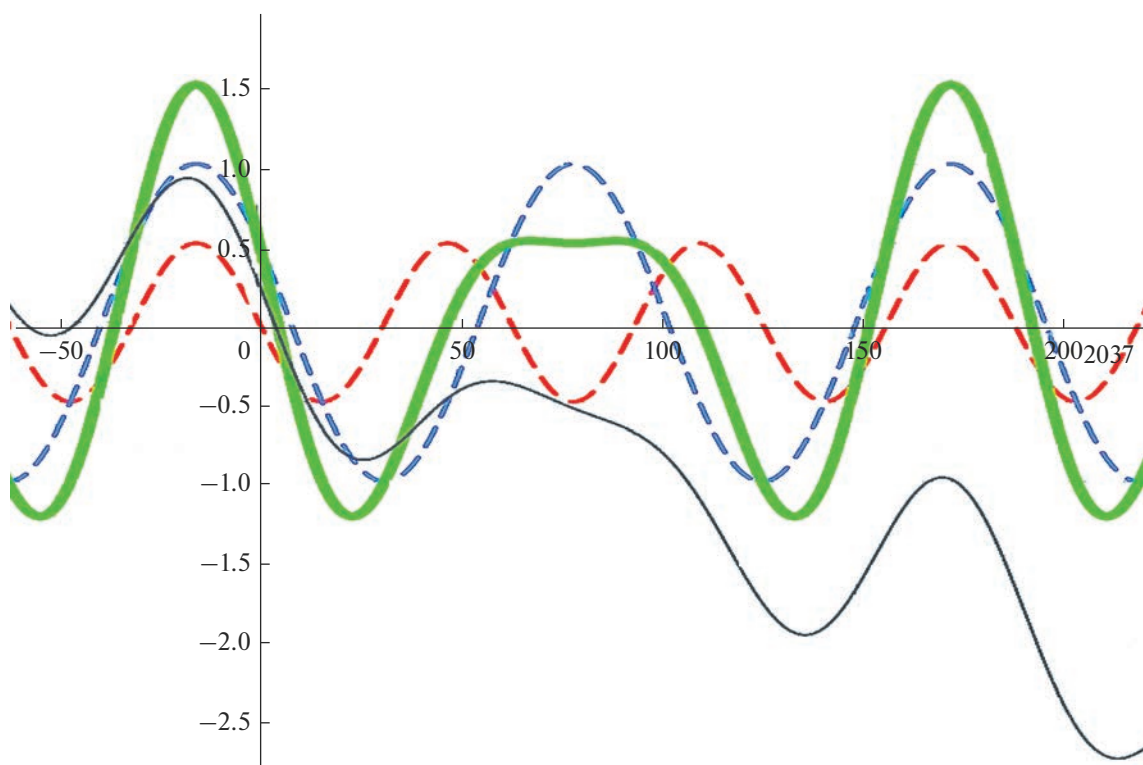


Рис. 6. Суммирование двух гармоник, одна из которых вдвое больше другой по амплитуде, но в полтора раза меньше по частоте.

Примечание: синим и красным пунктиром показаны гармоники, зеленой линией — их сумма, тонкая черная линия — результат добавления линейного тренда.

ским откликом на него. Последнее обстоятельство не означает, однако, и то, что данный, так называемый вековой, цикл не может быть обусловлен совсем другими причинами, например, проявлением автоколебательного процесса в системе океан–атмосфера (Хромов, 1973).

Аналитическая запись модельного описания кривой УКМ для участка 1790–2021 гг. (в метрах):

$$\begin{aligned} \text{УКМ}(t) = & 0.44 \cos\left(\frac{2\pi(t-1803)}{67}\right) + \\ & + 0.92 \cos\left(\frac{2\pi(t-1807)}{98}\right) + \\ & + 2.37 \cos\left(\frac{2\pi(t-1748)}{725}\right) - 27, \end{aligned} \quad (1)$$

где t — текущее время в годах.

Третье слагаемое в формуле (1) введено нами искусственно, со специально подобранным периодом изменения равным 725 годам. Это сделано в качестве попытки учета трудно вычисляемого многовекового тренда, который, в свою очередь, на рассматриваемом участке без потери точности аппроксимации вполне можно заменить линейной зависимостью, но тогда за границами рассматриваемого диапазона получались бы

нереально большие значения изменения уровня. С этой целью амплитуда и фаза тренда автоматически подбирались программой для указанного периода с учетом амплитуд других гармоник так, чтобы общий размах модельного уровня был не более 7.5 м. Последнее слагаемое в формуле характеризует среднее значение УКМ.

При исследовании более высокочастотных составляющих временного ряда изменений уровня моря следует отметить появление в спектре последнего двух отчетливых максимумов, соответствующих периодам около 30 и 38 лет, имеющих малые амплитуды (менее 0.2 м) и характер поведения в виде биений. Данное явление упоминается в исследованиях УКМ (Шлямин, 1962) как некие то обнаруживаемые, то полностью исчезающие квазитридцатилетние “брикнеровские частоты”.

Добавив в модель эти две компоненты, можно повысить точность аппроксимации:

$$\begin{aligned} \text{УКМ}_4(t) = & \text{УКМ}(t) + \\ & + 0.19 \cos\left(\frac{2\pi(t-1814)}{30}\right) + \\ & + 0.16 \cos\left(\frac{2\pi(t-1810)}{38}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

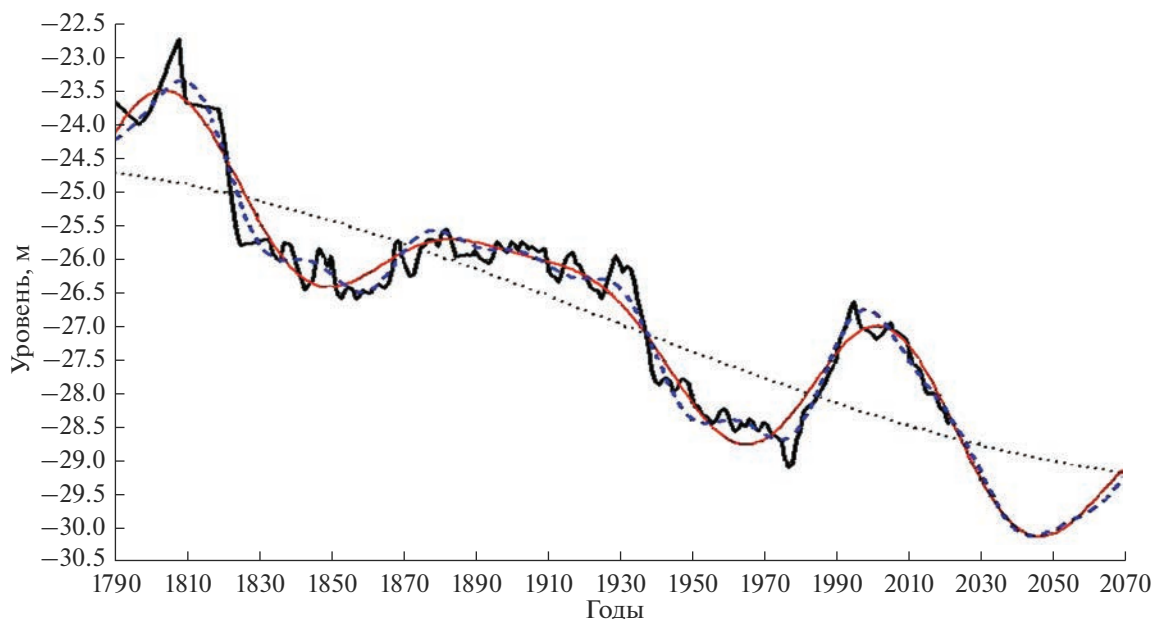


Рис. 7. Результат моделирования для участка 1790–2021 гг.

Примечание: сплошной линией показана кривая многолетних изменений уровня Каспийского моря (УКМ), точками обозначен тренд. Тонкая красная линия — результат расчета $УКМ(t)$ с учетом двух главных гармоник, синий пунктир — $УКМ_4(t)$ с учетом четырех гармоник.

Хотя их учет, как видно из рис. 7, несколько улучшает общую аппроксимацию, однако вклад этих двух дополнительных гармоник в общую картину поведения УКМ для временного интервала 2021–2060 гг. незначителен и мало изменяет общую картину, так как эти две гармоники на данном участке противофазны.

Расчет по формулам (1) и (2) показан на рис. 7 в виде кривых, которые аппроксимируют ход уровня моря в области 1790–2021 гг., а также в качестве примера экстраполируют его на некоторый временной отрезок вперед. Видно, что, если принять такую модель изменения УКМ, то после 2021 г. ожидается продолжение снижения уровня вплоть до 2045 г. с достижением минимальной отметки в районе -30 м, после чего начнется относительно плавное увеличение уровня моря.

Следует отметить, что положение момента смены знака изменения уровня определяется здесь значениями частот двух найденных главных гармоник и оно гораздо менее чувствительно по отношению к выбору параметров многовекового тренда, чем величина прогнозируемого минимального снижения уровня. Поэтому к последней нужно относиться в большей степени как к примерной оценке, которая при изменении периода тренда на 200 лет в большую или меньшую сторону может менять свою величину в пределах 0.5 м.

Что касается общей точности получающейся аппроксимации, то из рис. 7 и 8 хорошо видно, что разброс значений уровня относительно нее не

превышают 10% полной величины изменения УКМ для участка 1790–2021 гг. Среднеквадратичное отклонение при этом уменьшается с 1.4 до 0.2 м, а гистограмма меняет вид от многомодального распределения, характеризующего помимо прочего возможность наличия колебательных процессов внутри временного ряда, до одномодального близкого к случайному. Это, на наш взгляд, также свидетельствует в пользу вывода о существовании периодических компонент, главным образом определяющих многолетнюю динамику уровня моря.

Для оценки устойчивости результатов аппроксимации к положению границ интервала анализа можно сделать тестовый расчет, например, смоделировав ситуацию, предшествующую известному проекту переброски части стока северных рек и взяв для анализа участок 1790–1977 гг., рассчитать динамику уровня моря далее для временного отрезка 1978–2021 гг. В результате, как это видно на рис. 9, наблюдается вполне хорошее соответствие между восстановленными и реальными значениями УКМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании обзора результатов исследования колебаний уровня Каспийского моря и совместного использования современных и исторических данных проведен анализ временного ряда с целью выявления периодических компонент и построения с их помощью аппроксимирующего

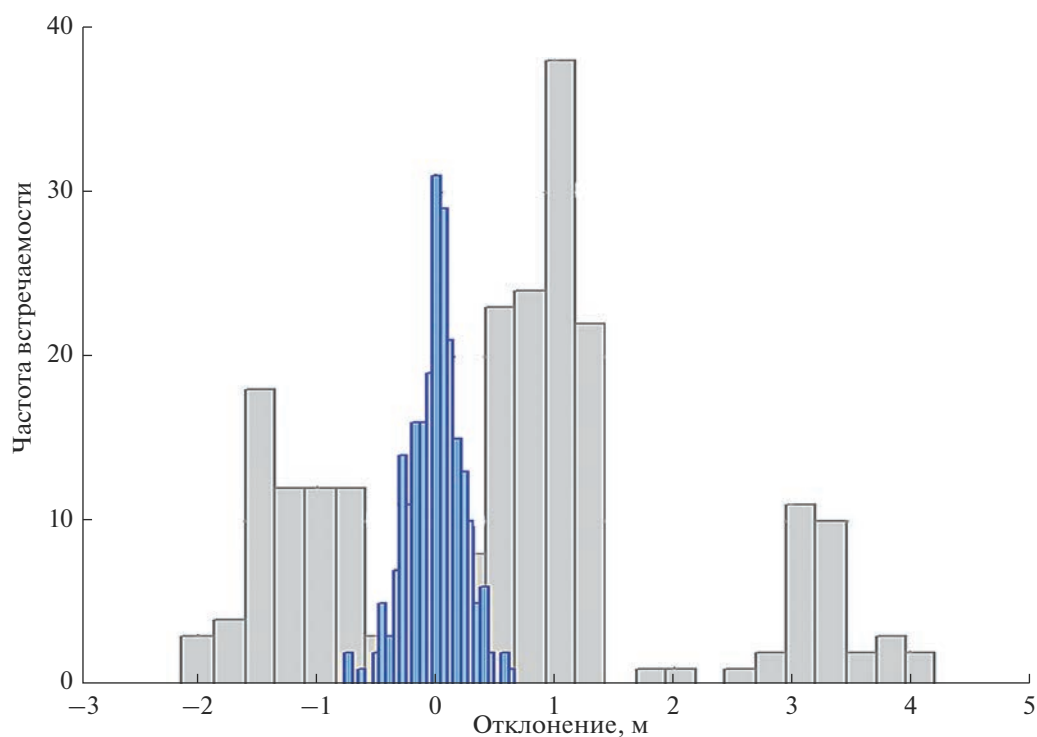


Рис. 8. Гистограмма разброса значений уровня Каспийского моря.

Примечание: серым цветом показаны отклонения уровня от среднего значения (–27 м) на интервале 1790–2021 гг., голубым — его отклонения от аппроксимирующей кривой.

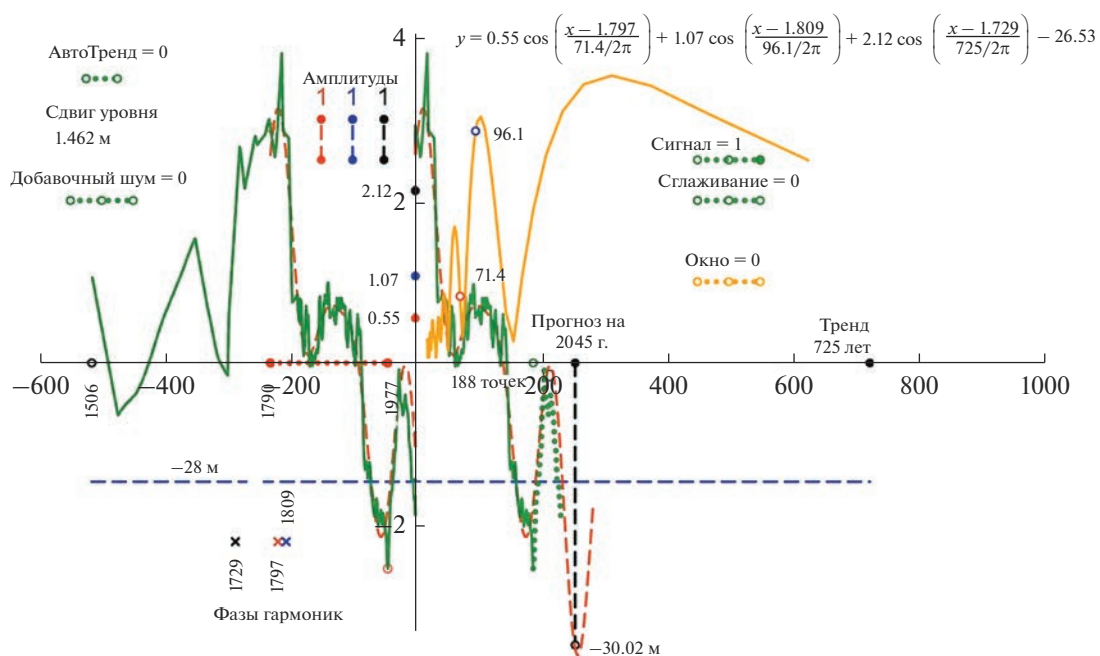


Рис. 9. Тестовый расчет уровня моря для 1978–2021 гг. по данным 1790–1977 гг.

Примечание: красная штриховая линия — результат моделирования. Зелеными точками справа показаны «условно неизвестные», но по факту наблюдавшиеся в реальности значения уровня Каспийского моря.

полинома. В результате получено, что при условии компенсации многовекового тренда такие колебания уровня в диапазоне 1790–2021 гг. можно успешно описать моделью на основе двух выявленных главных гармоник с периодами 67 и 98 лет и в качестве гипотезы оценить дальнейший ход уровня моря. Найденные две квазициклические компоненты, как и пара других более слабых с периодами 30 и 38 лет, соответствуют климатическим временным масштабам и относительно устойчивы внутри рассмотренного интервала, в то время как более мелкокомасштабная динамика среднегодового уровня, по нашим оценкам, носит практически случайный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабкин А.В.* Усовершенствованная модель оценки периодичности изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 63–73.
- Берг Л.С.* Уровень Каспийского моря за историческое время // Очерки по физической географии. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 205–272.
- Болгов М.В., Красножон Г.Ф., Любушин А.А.* Каспийское море: экстремальные гидрологические события / ред. М.Г. Хубларян. М.: Наука, 2007. 381 с.
- Болгов М.В., Филимонова М.К.* Об источниках неопределенности при прогнозировании уровня Каспийского моря и оценке риска затопления прибрежных территорий // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 664–669.
- Борисов Е.В., Ермаков В.Б., Мельников В.А.* Анализ периодической структуры климатических колебаний уровня Каспийского моря // Процессы в геосредах. 2019. № 2. С. 146–152.
- Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К.* Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 240 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / ред. Е.С. Нестеров. М.: Триада, 2016. 374 с.
- Выручалкина Т.Ю., Дианский Н.А., Фомин В.В.* Влияние на эволюцию уровня Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948–2017 гг. // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 230–240.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Серых И.В., Лебедев С.А.* Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291.
- Гусейнова С.А., Абдусаматов А.С.* Прогноз динамики уровня Каспийского моря и ее последствия для прибрежных территорий // Юг России: экология, развитие. 2015. Т. 10. № 4. С. 119–126.
- Ланно С.С., Рева Ю.А.* Сравнительный анализ долготермической изменчивости уровней Черного и Каспийского морей // Метеорология и гидрология. 1997. № 12. С. 63–75.
- Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Уровень Каспийского моря как индикатор крупномасштабного влагообмена в системе “океан–атмосфера–суша” // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 5–20.
- Никонова Р.Е.* О причинах и последствиях колебаний уровня Каспийского моря в 20–21 столетиях // Труды ГОИН. 2008. Вып. 211. С. 127–151.
- Рычагов Г.И.* Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2011. № 2. С. 4–11.
- Рычагов Г.И.* К методике геоморфологических исследований (геоморфологические уроки Каспия) // Геоморфология. 2019. № 4. С. 27–39.
- Соловьёва Н.Н.* Исследование зависимости колебаний уровня Каспийского моря от солнечной активности. СПб.: Изд. РГГМУ, 2004. 70 с.
- Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Архипкин В.С., Никонова Р.Е.* Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата // Вестн. Моск. ун-та. Серия. 5. География. 2011. № 2. С. 62–71.
- Федоров В.М., Фролов Д.М.* О возможной физической природе мультидекадного колебания в климатической системе Земли // Сложные системы. 2019. № 1 (30). С. 26–40.
- Фролов А.В.* Сценарные прогнозы колебаний уровня Каспия с учетом климатических и техногенных воздействий на водный баланс моря // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 5. С. 130–148.
- Хаустов В.В., Костенко В.Д.* К прогнозированию колебаний уровня Каспийского моря // Научные ведомости. Серия Естественные науки. 2018. Т. 42. № 2. С. 162–171.
- Хромов С.П.* Солнечные циклы и климат // Метеорология и гидрология. 1973. № 9. С. 93–110.
- Шлямин Б.А.* Сверхдолгосрочный прогноз уровня Каспийского моря // Изв. ВГО. 1962. Т. 94. Вып. 1. С. 26–33.
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S.* Long-term Caspian Sea level change // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. № 13. P. 6993–7001. <https://doi.org/10.1002/2017GL073958>
- Chen J., Cazenave A., Wang S.-Y., Li J.* Caspian Sea Level Change Observed by Satellite // Altimetry. Remote Sens. 2023. Vol. 15. № 3. Article 703. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/rs15030703>
- Elguindi N., Giorgi F.* Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. № 8. L08706. <https://doi.org/10.1029/2006GL025943>

Long-Term Changes in the Level of the Caspian Sea and Modern Options for Their Forecasting

V. B. Ermakov*

Zubov State Oceanographic Institute (FSBI "SOI"), Moscow, Russia

*e-mail: vitalerm@mail.ru

Various approaches to the study and forecast of long-term changes in the average annual level of the Caspian Sea are considered. Within the framework of the most common methods, it is considered that such estimates are possible only in a probabilistic sense since the main components of the seawater balance behave randomly. However, for the majority of consumers, a specifically designated perspective of a level change and a justification for the answer to the question are important: if there is another significant change, then how long and to what extreme value does it continue? With the accumulation of data on the dynamics of the atmosphere and ocean parameters, including the results of space monitoring, there are more and more reports on the identification of multidecadal recurrence in their time series. Over the past years, attempts have been repeatedly made, based on the study of sea level dynamics, to identify cyclical components within its time series in order to use them both to describe sharp declines and rises that occurred earlier and to predict similar changes in the future. Data analysis in this case consists of searching for such periods of variability within which the requirements of limited periodic composition and stability of the components that form the time series would be met. With the help of a specially created software environment, a study of a series consisting of historical and modern data on observations of the level of the Caspian Sea over the past 230 years was carried out in order to identify stable periodicities and build an approximating polynomial with their help. It is shown that in this time interval, in addition to the centuries-old trend, there are two clearly expressed quasi-cyclical components. The approximation made using them well describes the entire previous dynamics of the level up to 2021 and can be used as a basis for constructing forecast estimates.

Keywords: Caspian Sea, level change, time series analysis, multidecadal oscillation, approximation of the long-term level course by a set of harmonics

REFERENCES

- Babkin A.V. An improved model for assessing the frequency of changes in the level and elements of the water balance of the Caspian Sea. *Meteor. Hydrol.*, 2005, no. 11, pp. 63–73. (In Russ.).
- Berg L.S. The level of the Caspian Sea in historical time. In *Ocherki po fizicheskoi geografii* [Essays on Physical Geography]. Moscow; Leningrad: Akad. Nauk SSSR Publ., 1949, pp. 205–272. (In Russ.).
- Bolgov M.V., Krasnozhon G.F., Lyubushin A.A. *Kaspiiskoe more: ekstremal'nye gidrologicheskie sobytiya* [Caspian Sea: Extreme Hydrological Events]. Khablaryan M.G., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2007. 381 p.
- Bolgov M.V., Filimonova M.K. The Sources of Uncertainty in Forecasting Caspian Sea Level and Estimating the Inundation Risk of Coastal Areas. *Water Resour.*, 2005, vol. 32, pp. 605–610.
<https://doi.org/10.1007/s11268-005-0078-0>
- Borisov E.V., Ermakov V.B., Melnikov V.A. Analysis of the Periodic Structure of Climatic Fluctuations in the Level of the Caspian Sea. *Prots. Geosredakh*, 2019, no. 2, pp. 146–152. (In Russ.).
- Chen J., Cazenave A., Wang S.-Y., Li J. Caspian Sea Level Change Observed by Satellite Altimetry. *Remote Sens.*, 2023, vol. 15, no. 3, article 703.
<https://doi.org/10.3390/rs15030703>
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, no. 13, pp. 6993–7001.
<https://doi.org/10.1002/2017GL073958>
- Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, no. 8, article L08706.
<https://doi.org/10.1029/2006GL025943>
- Fedorov V.M., Frolov D.M. On the possible physical nature of the multidecadal oscillation in the Earth's climate system. *Compl. Syst.*, 2019, vol. 30, no. 1, pp. 26–40. (In Russ.).
- Frolov A.V. Scenario forecasts of Caspian level fluctuations taking into account climatic and technogenic impacts on the water balance of the sea. *Okeanol. Issled.*, 2019, vol. 47, no. 5, pp. 130–148. (In Russ.).
- Ginzburg A.I., Kostyanoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A. Climatic changes in the hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020). *Sovrem. Probl. Dist. Zond. Zemli Kosmos.*, 2021, vol. 18, no. 5, pp. 277–291. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291>
- Huseinova S.A., Abdusamadov A.S. Forecast of the dynamics of the level of the Caspian Sea and its consequences for coastal areas. *Yug Ross. Ekol. Razvit.*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 119–126. (In Russ.).
- Khaustov V.V., Kostenko V.D. To forecast fluctuations in the level of the Caspian Sea. *Nauch. Vedom., Ser. Est. Nauki*, 2018, vol. 42, no. 2, pp. 162–171. (In Russ.).
- Khromov S.P. Solar cycles and climate. *Meteor. Hydrol.*, 1973, no. 9, pp. 93–110. (In Russ.).
- Lappo S.S., Reva Yu.A. Comparative analysis of the long-term variability of the levels of the Black and Caspian

- Seas. *Meteor. Hydrol.*, 1997, no. 12, pp. 63–75. (In Russ.).
- Malinin V.N., Gordeeva S.M. Caspian Sea level as an indicator of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system. *Tr. Karel. Nauch. Ts. RAN*, 2020, no. 4, pp. 5–20. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17076/lim1156>
- Nikonova R.E. On the causes and consequences of fluctuations in the level of the Caspian Sea in the 20th–21st century. *Tr. GOIN*, 2008, no. 211, pp. 127–151. (In Russ.).
- Rychagov G.I. Fluctuations in the level of the Caspian Sea: causes, consequences, forecast. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2011, no. 2, pp. 4–11. (In Russ.).
- Rychagov G.I. To the methodology of geomorphological research (geomorphological lessons of the Caspian Sea). *Geomorph.*, 2019, no. 4, pp. 27–39. (In Russ.).
- Shlyamin B.A. Super-long-term forecast of the level of the Caspian Sea. *Izv. VGO*, 1962, vol. 94, no. 1, pp. 26–33. (In Russ.).
- Solov'eva N.N. *Issledovanie zavisimosti kolebaniy urovnya Kaspiiskogo morya ot solnechnoi aktivnosti* [Investigation of the Dependence of Fluctuations in the Level of the Caspian Sea on Solar Activity]. St. Petersburg: RGG-MU Publ., 2004. 70 p.
- Tuzhilkin V.S., Kosarev A.N., Arkhipkin V.S., Nikonova R.E. Long-term variability of the hydrological regime of the Caspian Sea due to climate variations. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2011, no. 2, pp. 62–71. (In Russ.).
- Varushchenko S.I., Varushchenko A.N., Klige R.K. *Izmeneniya rezhima Kaspiiskogo morya i besstochnykh vodotoev v paleovremeni* [Changes in the Regime of the Caspian Sea and Inland Reservoirs in Paleotime]. Moscow: Nauka Publ., 1987. 240 p.
- Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* [Water Balance and Fluctuations in the Level of the Caspian Sea. Modeling and Forecast]. Nesterov E.S., Ed. Moscow: Triada Publ., 2016. 374 p.
- Vyruchalkina T.Yu., Dianskii N.A., Fomin V.V. Effect of Long-Term Variations in Wind Regime over Caspian Sea Region on the Evolution of Its Level in 1948–2017. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 348–357.
<https://doi.org/10.1134/S0097807820020190>