

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ РАН

СБОРНИК ТРУДОВ

Всероссийской научной конференции
с международным участием

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В НАСТОЯЩЕМ, ПРОШЛОМ И БУДУЩЕМ



*Посвящается 120-летию
со дня рождения выдающегося советского
гидролога, профессора, доктора
географических наук
Марка Исааковича Львовича*

Москва
2026

УДК 556(063)
ISBN 978-5-89658-079-9

Печатается по решению
Ученого совета Института географии РАН

Статьи публикуются в авторской редакции

Рецензенты:

д.г.н. *Е.А. Черенкова*
д.г.-м.н. *И.В. Чеснокова*

Редакционная коллегия:

д.г.н. *Н.И. Коронкевич* (отв. редактор)
к.г.н. *Е.А. Кашутина*
к.г.н. *М.В. Сидорова*
к.г.н. *Е.А. Барабанова*
к.г.-м.н. *Е.С. Гришанцева*

Водные ресурсы в настоящем, прошлом и будущем: сб. мат. Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения профессора, доктора географических наук М.И. Львовича (Москва, 13–15 мая 2026 г.) / отв. ред. Н.И. Коронкевич и др. – М.: Институт географии РАН, 2026. – 496 с. – ISBN 978-5-89658-079-9

Материалы сборника отражают современные направления исследований в области гидрологии, водных ресурсов и водного хозяйства. Представлены результаты работ, посвященных методам гидрологических исследований, оценке элементов водного баланса, речному стоку, гидрологическому моделированию, качеству природных вод, влиянию климатических изменений и антропогенных факторов на водные объекты, а также вопросам рационального использования и охраны водных ресурсов.

Издание рассчитано на научных сотрудников, преподавателей, аспирантов, студентов и специалистов в области гидрологии, географии, экологии и водного хозяйства.

Water Resources in the Present, Past, and Future: proceedings All-Rus. scientific conf. with int. participation dedicated to the professor M.I. Lvovich 120th anniversary (Moscow, May 13–15, 2026) / ed. N.I. Koronkevich [et al.] . – Moscow: Institute of Geography RAS, 2026. – 496 p. – ISBN 978-5-89658-079-9

The collection's materials reflect current research trends in hydrology, water resources, and water management. It presents the results of studies devoted to hydrological research methods, water balance assessment, river runoff, hydrological modeling, natural water quality, the impact of climate change and anthropogenic factors on water bodies, and issues of rational use and protection of water resources.

The publication is intended for researchers, graduate students, undergraduate students, and specialists in hydrology, geography, ecology, and water management.

ISBN 978-5-00000-000-0
DOI

© Авторы трудов, 2026
© Институт географии РАН, 2026

ПРЕДИСЛОВИЕ



Настоящий сборник содержит материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные ресурсы в настоящем, прошлом и будущем», которая проходила в Москве с 13 по 15 мая 2026 г. на площадках Института географии РАН, Геологического института РАН и Института физики атмосферы РАН. Конференция была посвящена 120-летию со дня рождения выдающегося советского гидролога, доктора географических наук, профессора Марка Исааковича Львовича, чье имя занимает особое место в истории отечественной гидрологической науки. Его фундаментальные исследования водного баланса суши, закономерностей формирования речного стока, пространственно-временного распределения водных ресурсов и принципов их рационального использования оказали значительное влияние на развитие

гидрологии, физической географии и водного хозяйства. Многие научные идеи и методологические подходы, сформулированные М. И. Львовичем, сохраняют свою актуальность и сегодня, являясь важной основой для современных исследований гидрологических процессов и оценки состояния водных ресурсов.

Современная гидрология развивается в условиях стремительных изменений природной среды и антропогенного воздействия на водные объекты. Изменение климата приводит к трансформации гидрологического режима рек и озер, изменению структуры водного баланса, перераспределению водных ресурсов во времени и пространстве, учащению экстремальных гидрологических явлений. Одновременно происходит влияние хозяйственной деятельности на водосборы и водные экосистемы, возрастает потребность в научно обоснованных подходах к управлению водными ресурсами и обеспечению водной безопасности. В этих условиях особую значимость приобретают комплексные исследования, объединяющие данные наблюдений, современные методы математического моделирования, геоинформационные технологии, дистанционное зондирование Земли и междисциплинарные подходы к изучению водных систем. Решение задач рационального использования и охраны водных ресурсов требует тесного взаимодействия специалистов в области гидрологии, географии, климатологии, экологии, гидрохимии, водного хозяйства и смежных дисциплин.

Представленные в сборнике материалы отражают современные актуальные направления исследований в области гидрологии и водных ресурсов, показывают развитие классических фундаментальных концепций формирования, распределения и использования водных ресурсов и их прикладное значение и демонстрируют преемственность научных идей, заложенных одним из основоположников отечественной географо-гидрологической школы М. И. Львовичем. В опубликованных материалах рассматриваются водные объекты различных территорий и природных зон, что позволяет проследить региональные особенности гидрологических процессов и оценить разнообразие современных подходов к их изучению, моделированию и прогнозированию. Отдельное внимание уделено исследованию последствий современных климатических изменений для водных ресурсов различных регионов России, анализу экстремальных гидрологических явлений, вопросам адаптации природопользования и водного хозяйства к изменяющимся условиям окружающей среды. Существенная часть работ посвящена решению актуальных водохозяйственных и экологических проблем, разработке методов оценки состояния водных объектов и совершенствованию подходов к управлению водными ресурсами.

В конференции приняли участие ученые, преподаватели, аспиранты, молодые исследователи и специалисты научных организаций, образовательных учреждений и производственных предприятий из различных регионов России и зарубежных стран. Надеемся, что результаты исследований будут интересны и полезны специалистам в области гидрологии, географии, экологии, климатологии и водного хозяйства, послужат развитию научных исследований и профессионального диалога, а также внесут вклад в решение актуальных задач изучения, сохранения и рационального использования водных ресурсов в условиях современных природных и социально-экономических вызовов. Отметим, что не все представленные на конференции работы включены в этот сборник. Большинство пленарных докладов, а также рекомендованные кураторами секций выступления участников конференции будут опубликованы в специальном выпуске журнала «Известия РАН. Серия географическая» (2027) и в журнале «Проблемы региональной экологии» (2026-2027).

Редакционная коллегия



БЛАГОДАРНОСТИ

Редакционная коллегия, оргкомитет конференции выражают искреннюю благодарность всем, принявшим участие в работе конференции и в подготовке настоящего издания: директорам Института географии РАН *Ольге Николаевне Соломиной* и *Андрею Валерьевичу Панину*, заместителю директора ИГРАН *Александру Борисовичу Себенцову*, руководству и сотрудникам Геологического института РАН и Института физики атмосферы РАН – за поддержку, серьезную и важную помощь в проведении конференции на площадках своих институтов; инициатору, главному организатору и координатору конференции *Марии Сидоровой* и ее основным помощникам – *Кириллу Лукьянову* и *Александре Одерковой*; инициатору проведения конференции *Александру Георгиади*; научному руководителю и вдохновителю конференции *Николаю Ивановичу Коронкевичу* – за тщательную подготовку программы конференции, ее высокий научный уровень; *Галине Михайловне Черногаевой*, *Сергею Ясинскому*, *Сергею Долгову*, *Сергею Шапоренко* и *Ирине Зайцевой* – за ценные советы и рекомендации; сотрудникам и аспирантам Института географии *Любови Паришиной*, *Михаилу Карпенко*, *Арсению Кудикову*, *Юрию Алентьеву*, *Кириллу Матафонову*, *Валерии Ивановой*, *Ангелине Маскальченко*, *Дарье Ласкиной*, *Дарье Андреевой*, *Ивану Дрозду*, *Алексее Бугримову* – за высокий уровень технического обеспечения заседаний и создание комфортной атмосферы для участников; *Елене Барабановой*, *Елене Гришанцевой*, *Екатерине Кашутиной* – за организационную работу и подготовку материалов конференции к печати, всем руководителям пленарного и секционных заседаний, а также их участникам, без которых эта конференция не состоялась бы.

“...с огромной радостью выражаю нашу искреннюю благодарность коллективу Лаборатории гидрологии за удивительную конференцию! Это было знаковое событие, настоящий праздник гидрологии! Все участники были счастливы возможности такого теплого, доверительного и уважительного общения! Встретились все, кто давно не имел возможности повидаться, поговорить лично, поделиться успехами и сомнениями. И очень важно – было много молодежи, которая могла почувствовать себя уверенно рядом с мэтрами!

Было столько эмоций и впечатлений...”

Ольга Горелиц (ГОИН)

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
Пленарное заседание.....	13
<i>Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Зайцева И.С. Россия на современной водохозяйственной карте мира.....</i>	<i>13</i>
Секция 1. Методы гидрологических исследований.....	17
Подсекция 1.1. Методы оценки элементов водного баланса.....	17
<i>Добровольский С.Г., Юшков В.П., Соломонова И.В., Юшкова О.В. О применении теории К. Хассельманна при сверхдолгосрочном прогнозировании речного стока.....</i>	<i>17</i>
<i>Агафонов Л.И., Гурская М.А. Особенности гидрологического режима р. Обь и их дендрохронологическая интерпретация.....</i>	<i>22</i>
<i>Абрамов Д.В. Районирование рек Российской Федерации методами гидрологического подобия и геостатистики.....</i>	<i>26</i>
<i>Бабкин А.В. Изменение уровня, площади и испарения бессточного озера при систематическом изъятии вод его бассейна.....</i>	<i>29</i>
<i>Батмазова А.А., Гайдукова Е.В. Применение иерархического подхода для моделирования уровенного режима озер.....</i>	<i>33</i>
<i>Бородин О.О., Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н., Загребаев В.Ю. Пользовательская версия национальной гидрологической моделирующей системы.....</i>	<i>38</i>
<i>Сулейманов М.А, Самохин А.А., Гайдукова Е.В. Применение методов машинного обучения для прогнозирования дат ледовых явлений.....</i>	<i>42</i>
<i>Грек Е.Н., Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Кузнецова О.М., Ефимова М.А. Об оценках водных ресурсов административных территорий.....</i>	<i>46</i>
<i>Дубачева А.В., Дмитриева В.А., Кочетова Ж.Ю. Исследование динамики стока реки Битюг с применением теории детерминированного хаоса.....</i>	<i>49</i>
<i>Загребаев В.Ю. Анализ чувствительности модели формирования речного стока ЕСОМАГ к плотности метеорологической сети на ЕТР.....</i>	<i>54</i>
<i>Кутузов А.В. Мониторинг морфометрии водоемов на основе ЦМР по оптическим данным дистанционного зондирования.....</i>	<i>57</i>
<i>Макаров Н.А., Гайдукова Е.В. Прогнозирование стока рек Северо-Западного региона методами многомерной статистики.....</i>	<i>61</i>
<i>Павлюкевич Е.Д., Деркачева А.А. Валидация глобальных карт опасности наводнений JRC для рек России по спутниковым данным и официальным картам зон затопления.....</i>	<i>65</i>
<i>Распутина В.А., Пряхина Г.В., Зырянова Д.С. Расчет притока воды к приледниковому озеру.....</i>	<i>69</i>
<i>Рыбкина И.Д. Опыт оценок водообеспеченности в речных бассейнах разного иерархического уровня (на примере рр. Оби и Иртыша).....</i>	<i>74</i>
<i>Соловьева А.Д. Мониторинг природных вод на территории ООПТ «Романцевские горы».....</i>	<i>78</i>

<i>Вуглинский В.С., Сушкова В.А.</i> Корректировка спутниковых данных по уровню воды озер и их использование для восстановления пропусков в рядах наземных наблюдений (на примере озера Иссык-Куль).....	82
<i>Фролов А.В., Соломонова И.В.</i> Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний речного стока на основе применения подхода А. А. Фридмана и Л. В. Келлера.....	87
<i>Цыпленков А.С., Абрамов Д.О., Морейдо В.М.</i> Восстановление пропусков среднесуточных расходов воды на постах РФ с использованием GloFAS-ERA5.....	91
<i>Катрасов С.В., Шамов В.В., Бугаец А.Н.</i> Оценка современного затопления берегов озера Ханка на основе гидродинамического моделирования.....	95
<i>Чепикова С.С.</i> Альтиметрия рек и озер Северо-Запада по данным SWOT.....	99
<i>Толкачева В.Ф. Гарцман Б.И., Энтин А.Л.</i> Построение среднемноголетних расходов воды рек Черноморского побережья Кавказа с помощью модели речной сети.....	102
<i>Двоеглазова Н.В.</i> Инструментальное подтверждение возникновения обратных течений на устьевом участке реки Преголи по данным натурных измерений.....	106
<i>Шайдулина А.А., Гырдымов Д.А., Скороход А.С.</i> Расчеты стока рек в период снеготаяния на водосборе Камского водохранилища.....	110
Подсекция 1.2. Методы оценки гидрохимических показателей и качества вод.....	115
<i>Владимирова Н.А., Квашина А.Е., Смирнова М.А.</i> Оценка загрязненности рек Северного Урала по динамике экосистем речных долин: дистанционный анализ территорий с различной степенью и причинами нарушенности.....	115
<i>Григорьева М.Л., Гришанцева Е.С., Воробьев С.А.</i> Обработка геохимических данных методом факторного и корреляционного анализа на примере Иваньковского водохранилища.....	120
<i>Дребот В.В., Борзенко С.В., Шуакар-Сташ О., Стотлер Р.</i> Использование стабильных изотопов бора ($\delta^{11}\text{B}$) для изучения его концентрирования в подземных водах на фоне засоления в условиях меняющегося климата на примере Забайкалья.....	122
<i>Кутузов А.В., Поддубный С.А.</i> Применение методов дистанционного зондирования для изучения теплового режима Рыбинского водохранилища.....	126
<i>Лесникова П.С., Захарихина Л.В.</i> Гидрохимический показатель малых рек, отражающий интенсивность городской нагрузки (на примере г. Сочи).....	129
<i>Разумовский Л.В., Кушнарева Т.Н.</i> Обзор результатов новой концепции комплексного мониторинга.....	131
<i>Расулова А.М., Кондратьев С.А.</i> Дистанционная оценка трофического статуса озер с использованием методов математического моделирования.....	134
<i>Рахуба А.В.</i> Численное моделирование пространственно-временной динамики содержания растворенного кислорода, первичной продукции и деструкции органического вещества в Куйбышевском водохранилище.....	136
<i>Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Реутова Н.В.</i> Влияние неовулканических центров Северного Кавказа на химический состав природных вод.....	140

<i>Решетняк О.С., Решетняк В.Н.</i> Комплексная оценка состояния речных экосистем Кольского полуострова (по данным государственного мониторинга).....	143
<i>Фащевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г., Вишневская И.А.</i> Разработка азотного блока пространственно распределенной гидролого-гидрохимической модели формирования водного стока и качества воды ЕСОМАГ-N.....	147
<i>Шулькин В.М.</i> Влияние крупных коллоидов на химический состав и оценку качества речных вод на примере рек Дальнего Востока РФ.....	151
<i>Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Гришанцева Е.С., Расулова А.М., Сидорова М.В., Алферова А.А.</i> Методика оценки составляющих баланса химических веществ верховолжских водохранилищ.....	155
Секция 2. Водный баланс, гидрологический режим и водные ресурсы территории.....	157
<i>Волчек А.А.</i> Водные ресурсы реки Днепр на территории Беларуси.....	157
<i>Второва А.И.</i> Изменчивость уровня воды в озере Увильды.....	161
<i>Горелиц О.В., Сапожникова А.А., Ермакова Г.С., Мигунов Д.А.</i> Водный режим и потери стока в устьевой области Волги.....	166
<i>Домнин Д.А., Коротаева Н.Н.</i> Географические особенности и морфо-гидрологические характеристики прибрежных водоемов российских секторов Балтийского моря.....	170
<i>Евтеева О.В., Дмитриева В.А.</i> Зимний гидрологический режим рек юга Воронежской области.....	174
<i>Жунусова О.Р., Макарьева О.М., Нестерова Н.В.</i> Использование новых натурных данных наблюдений для оценки водного баланса малого горного водосбора на территории криолитозоны.....	178
<i>Иманов С.Ф., Иманов Ф.А.</i> Классификация рек Карабаха по водному режиму.....	182
<i>Каинова С.А.</i> Типизация ледового режима рек России.....	185
<i>Калугин А.С.</i> Прогнозные оценки изменений гидрологического режима основных рек Московской области в XXI веке.....	189
<i>Кидяева В.М., Аверина А.А., Юдина В.А., Павлюкевич Е.Д., Губанов А.С.</i> Оценка потенциальной опасности прорывов ледниковых озер Кавказа на основе каталога 2025 года.....	192
<i>Кораблева О.В.</i> Сравнение амплитудных колебаний уровней поверхностных вод реки Керженец в XX и XXI веках.....	196
<i>Курочкина Л.С.</i> Пространственно-временная изменчивость годового притока в Балтийско-Беломорском регионе.....	201
<i>Лебедева Л.С.</i> Изменения речного стока в бассейне реки Лена (Восточная Сибирь).....	205
<i>Магрицкий Д.В.</i> Современные и неблагоприятные изменения водного режима рек на северо-востоке АТР.....	208
<i>Парфенова Е.И., Чебакова Н.М.</i> Испаряемость, испарение и влажность почвы в горах Южной Сибири.....	213

<i>Постникова Т.Н., Рыбак О.О., Зеколари Х., Губанов А.С.</i> Снижение эквивалентности при калибровке поверхностного баланса массы ледников Кавказа.....	217
<i>Пряхина Г.В., Распутина В.А.</i> Оценка элементов водного баланса моренно-подпрудного озера Таможенное (Алтай).....	219
<i>Сивохин Ж.Т.</i> Многолетние колебания стока рек степной зоны (на примере бассейнов рек Урал и Тобол).....	222
<i>Волчек А.А., Сидак С.В., Парфомук С.И., Коляда Ю.П.</i> Мультивременные тенденции изменения максимальных расходов воды весеннего половодья на реках Беларуси.....	226
<i>Шайдулина А.А., Китаев А.Б., Петраш М.А., Фасахов М.А.</i> Водный режим Камского водохранилища на современном этапе.....	230
<i>Головань Е.В., Мякишева Н.В.</i> Уровенный режим разнотипных озер различных ландшафтно-географических зон России в современных условиях.....	233
Секция 3. Физико-химические свойства и качество воды рек и водоемов.....	238
<i>Акулов Д.А., Андреев Я.С., Волкова Е.А., Захарова А.М., Захарова К.С., Козина В.Ю., Маркова М.М., Милютин А.Д., Михайлина А.М., Ничипорович А.В., Орлова Е.Р., Топилина В.М., Фомина В.П., Хозяшева А. В., Шалунова Е.П.</i> Оценка вод Мушинского ручья (Санкт-Петербург) по гидрохимическим показателям.....	238
<i>Александрова А.Б., Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Валиев В.С., Хасанов Р.Р., Маланин В.В., Марасов А.А., Солодников О.М.</i> Органический углерод в почвах водосборных территорий и донных отложений озер – ООПТ Предкамья Республики Татарстан.....	242
<i>Архипов Е.А., Зотов С.И., Спирин Ю.А., Платоненко Г.О., Лузина А.Д., Здобин М.А.</i> Оценка химического загрязнения рек с сельскохозяйственной, промышленной и рекреационной нагрузкой в Калининградской области.....	244
<i>Болдескул А.Г., Юрченко С.Г., Луценко Т.Н., Шамов В.В., Лупаков С.Ю.</i> Сезонная динамика качества воды городских рек Владивостока.....	248
<i>Григорьева И.Л.</i> Современное содержание органического вещества в воде Верхневолжских водохранилищ в летний период.....	253
<i>Гирло Е.М., Чалов С.Р., Харченко С.В.</i> Оценка вклада источников поступления взвешенного вещества методом трассировки источников наносов.....	257
<i>Гречушников М.Г., Ломова Д.В., Пуклаков В.В., Ломов В.А., Куликова Я.</i> Внутренняя и внешняя фосфорная нагрузка Ивановского водохранилища.....	260
<i>Гришанцева Е.С., Алентьев Ю.Ю.</i> Особенности распределения редкоземельных элементов в озерах, ледниковом стоке и снеге острова Северный архипелага Новая Земля.....	264
<i>Дреева Ф.Р., Реутова Н.В., Реутова Т.В.</i> Микроэлементы в поверхностных водах горной части Республики Северная Осетия-Алания.....	269
<i>Дубровская Т.В., Лычагин М.Ю.</i> Накопление тяжелых металлов и металлоидов в эпифитовзвеси на устьевом взморье Волги.....	273
<i>Козлова М.А.</i> Влияние лекарственного загрязнения на качество поверхностных вод.....	277
<i>Курузова И.А.</i> Микробные комплексы альгобактериальных и бентосных сообществ озер оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида.....	281
<i>Лукьянов К.В.</i> Медь в сточных водах и в реках Европейской части России	287

<i>Минакова Е.А., Шлычков А.П., Кондратьев С.А.</i> Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды водохранилищ Европейской территории России на примере Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан...	289
<i>Науменко М.А., Гузиватый В.В.</i> Пространственно-временная изменчивость термического режима Ладожского озера: современный анализ.....	293
<i>Разумовский В.Л., Анисимова А.В.</i> Закономерности изменения концентраций тяжелых металлов в донных осадках водохранилищ.....	296
<i>Спирин Ю.А., Зотов С.И., Таран В.С.</i> Пространственно-временная динамика качества речных вод в бассейне Анграты Калининградской области за трехлетний период.....	299
<i>Стецюк А.П.</i> Концентрация ртути в воде и взвеси Черного моря в 2025 г. (по материалам рейсов НИС «Профессор Водяницкий»).....	303
<i>Тобратов С.А., Железнова О.С.</i> Факторы и геохимические особенности летнего меженного стока (на примере одного из регионов центра Русской равнины).....	306
<i>Хорошевская В.О., Голубкина М.А.</i> К вопросу об источниках повышенного содержания ванадия и молибдена в донных отложениях Таганрогского залива.....	311
<i>Черных В.В., Яндола Н.И.</i> Экологическое состояние водных объектов восточных районов Новосибирской области.....	316
<i>Яндола Н.И., Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Бежин Н.А.</i> Экологическое состояние водных объектов Байдарской долины (Крымский полуостров).....	320
Секция 4. Факторы формирования и изменения гидрологических характеристик.....	324
<i>Баранова М.С., Обьедкова О.А., Филиппов О.В., Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Кучерова А.М.</i> Экологические последствия процесса отделения заливов Волгоградского водохранилища в условиях современных климатических изменений...	324
<i>Буркова А.А.</i> Хабаровское разветвление реки Амур: история развития и современная динамика.....	328
<i>Возняк А.А.</i> Исследование трендов многолетних колебаний стока в бассейне р. Камы...	332
<i>Дудакова Д.С., Анохин В.М.</i> Трансформация подводных ландшафтов прибрежной зоны Ладожского озера под влиянием антропогенной деятельности.....	336
<i>Дюкарев Д.Е.</i> Применение уравнения Будыко–Фу для оценки климатической эластичности стока в створе р. Сосна – г. Елец.....	340
<i>Землянскова А.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В.</i> Особенности формирования стока рек горной криолитозоны северо-востока России с наледным питанием на примере реки Анмангынды.....	344
<i>Катайкина О.И., Матвеев В.И.</i> Особенности гидрологических и гидрохимических условий озера Ханка в зимний период.....	348
<i>Кашутина Е.А., Коронкевич Н.И., Одеркова А.П., Гапич Е.С.</i> Влияние изменения структуры лесного покрова России на испарение и речной сток за последние десятилетия.....	352
<i>Коростелев С.Г., Болдырев В.С., Яковлев С.В.</i> Влияние Озерновского горно-обогатительного комбината (ОГМК) на ихтиофауну верховьев рек Озерная Восточная и Ука Камчатского полуострова.....	354

<i>Махинова А.Ф., Махинов А.Н., Liu Shuguan.</i> Влияние урбанизации и наводнений на геохимическую активность элементов и их миграцию в долинах рек Восточной Азии..	358
<i>Маргарян В.Г., Фролова Н.Л., Гайдукова Е.В., Мисакян А.Э., Фрунзикаян О.Б.</i> Оценка влияния изменения климата на ледовый режим реки Аргичи (бассейн озера Севан, Армения)	363
<i>Морейдо В.М., Иглин С.М.</i> Разработка долгосрочных прогнозов притока воды к водохранилищам в России: проблемы и перспективы.....	367
<i>Попова В.В., Насонова О.Н.</i> Квазипериодические колебания увлажнения на севере европейской части России на фоне глобального потепления: климатические факторы и проявление в речном стоке.....	371
<i>Ясинский С.В., Сидорова М.В., Хохлов Д.Н., Соболев С.В., Одеркова А.П., Нарыков А.Н.</i> Сезонная трансформация поверхностного стока в условиях изменения климата и эволюции городских ландшафтов (на примере Нижнего Новгорода).....	375
<i>Шмакова М.В.</i> Водный и твердый сток Арктических рек в условиях текущих климатических изменений.....	377
Секция 5. Водохозяйственные и экологические проблемы и подходы к решению.....	380
<i>Аллахиссем С.</i> Роль испарения в водном балансе озера Чад: оценка потерь и методы их снижения.....	380
<i>Балонишников Ж.А., Еремеева А.О.</i> Водообеспеченность населения и экономики в России в условиях изменения климата: количественные и качественные оценки.....	384
<i>Барabanов А.Т.</i> Управление эрозионно-гидрологическим процессом – основа создания системы противоэрозионной защиты сельскохозяйственных земель.....	389
<i>Никитина О.И., Хотулева М.В., Шварц Е.А., Буторин А.А., Кирилюк О.К., Егидарев Е.Г., Килина М.А., Байбар А.С.</i> Формирование подходов к экологической оценке воздействия проекта ГЭС «Эгийн гол» на трансграничный бассейн реки Селенги и озеро Байкал.....	393
<i>Демин А.П.</i> Обеспечение населения регионов бассейна р Волги качественной питьевой водой.....	397
<i>Махинов А.Н.</i> Современные тенденции изменения гидрологического режима реки Амур и водохозяйственные проблемы.....	401
<i>Мотовилов Ю.Г., Фащевская Т.Б.</i> Пространственный анализ риска заболеваний населения, вызванных избытком тяжелых металлов в речных водах.....	404
<i>Никитина О.И., Косолапов А.Е.</i> Экологический сток в трансграничном бассейне реки Иртыш: разработка принципов учета экосистемных потребностей при водodelении....	408
<i>Новикова Н.М., Уланова С.С., Мамутов Н.К.</i> Сбросные водоемы аридных территорий Евразии.....	410
<i>Падалко Ю.А.</i> Природо-хозяйственная структура бассейна р. Урал: проблемы и экологические риски.....	414
<i>Поляков Э.В.</i> Формирование единого бассейна подземных шахтных вод и перспективы использования водных ресурсов.....	417
<i>Рыбина Е.Ю.</i> Комплексная геопространственная оценка проекта освоения Каттарской впадины (Египет): анализ потенциальных выгод и проблемных аспектов реализации...	421

<i>Санин А.Ю., Бортников Е.Г.</i> К вопросу о повышении эффективности управления водными ресурсами вододефицитного региона на примере Запорожской области РФ...	424
<i>Шишкин М.А., Дмитриева В.А.</i> Водные ресурсы реки Девица и аспекты водопользования в ее бассейне.....	428
<i>Подлипский И.И.</i> Обзор технологий рекультивации нарушенных земель акваторий.....	432
<i>Шумакова Е.М., Митина Н.Н.</i> Регламенты эксплуатации территорий, прилегающих к крупным гидроузлам, в свете новых закономерностей их взаимодействия со средой....	435
Заочные участники.....	439
<i>Абдулмуталимова Т.О.</i> Гидрогеохимические аспекты качества подземных вод республики Дагестан.....	439
<i>Бесараб Н.В., Климович И.Д., Самусев Т.В.</i> Оценка на геномном уровне потенциала бактериофагов <i>Microcystis</i> для контроля цветения воды.....	443
<i>Боева А.С., Потапова Э.Г., Баранова А.А.</i> Оценка вклада природных и техногенных факторов риска в формирование качества подземных вод как объекта хозяйственно-питьевого водоснабжения.....	448
<i>Волкова З.В.</i> Многолетние изменения качества вод в вершине дельты Волги.....	452
<i>Кревень Ю.О., Ларина Н.С., Ларин С.И.</i> Геохимические особенности распределения железа и марганца в малых реках бассейна реки Ишим (Тюменская область).....	455
<i>Назаренко О.В.</i> Геоэкологические особенности родников Майкопского района Республики Адыгея	458
<i>Первышева О.А., Лавренко Н.Ю.</i> Динамика изменения и современное качество воды Воронежского водохранилища (2015–2024 гг.).....	462
<i>Петрова Ю.А., Гаврилова Ю.А.</i> Особенности пространственного распределения гидрологических показателей воды в реке Черная с 2019 по 2024 гг. (Севастополь, юго-западный Крым).....	466
<i>Прожорина Т.И., Баранова А.А., Потапова Э.Г.</i> Комплексная оценка качества воды источников децентрализованного водопользования селитебных территорий Воронежской области.....	470
<i>Тулякова Е.С.</i> Сравнение свойств коагулянтов, применяемых для водоподготовки.....	474
<i>Фонова С.И., Эпитаивили А.В.</i> Исследование химического состава очищенных сточных вод города Екатеринбург.....	478
<i>Чекмарева Д.П., Романюк О.Л., Лавренко Н.Ю.</i> Современное состояние уровня загрязненности воды бассейна реки Чульман.....	482
<i>Чепурная Т.А., Ермакович Е.А.</i> Пространственно-временная динамика содержания нефтепродуктов в воде реки Камчатка в 2005–2024 гг.....	487
<i>Шестеркин В.П.</i> Трансформация химического состава вод среднего Амура в зимний период.....	490
Решение конференции.....	493

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

Материалы пленарного заседания, кроме одного, приведенного ниже, а также рекомендованные кураторами секций выступления участников конференции, опубликованы в специальном выпуске журнала «Известия РАН. Серия географическая» (2027) и в журнале «Проблемы региональной экологии» (2026-2027).

УДК 556.5

РОССИЯ НА СОВРЕМЕННОЙ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ КАРТЕ МИРА

Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С.

Институт географии РАН, Москва, Россия

koronkevich@igras.ru

Аннотация. Сопоставлены средние многолетние водные ресурсы (речной сток) и водопотребление на уровне 2020 г. в пределах континентов, отдельных их частей, России и мира в целом. Оценены объемы воды, которые перемещаются в мире и России в составе различных видов продукции. Они составляют незначительную часть объема воды, традиционно учитываемой в водохозяйственных расчетах. Показано, что такой показатель, как кратность разбавления сточных вод речным стоком, нередко не отвечает реальному состоянию качества воды, а загрязняющие вещества, содержащиеся в сточных водах, составляют лишь небольшую часть вещественного состава вод, выносимого крупными реками.

Ключевые слова: водопотребление, водозабор, безвозвратный расход, вода в составе перемещаемой продукции, сточные воды, диффузное загрязнение рек.

Анализируя в связи с юбилеем М. И. Львовича научную деятельность его и созданной им географо-гидрологической школы, следует отметить, что одним из основных ее направлений была глобальная тематика – сопоставление гидрологических и водохозяйственных показателей мира и нашей страны (Львович, 1945, 1974, 1986; Львович и др., 1991). Мы продолжили эту традицию применительно к современному периоду (Коронкевич и др., 2020а, 2020б; 2022а, 2022б, 2022в; 2024а, 2024б; 2026).

В этих работах были использованы данные ГГИ, ФАО, сведения, содержащиеся в различных публикациях, в первую очередь, в указанных выше работах М. И. Львовича, а также в (Водные..., 2008; Мировой..., 1974), в Водном кадастре, Национальных докладах.

Как следует из анализа рис. 1, средний многолетний речной сток в мире составляет около 43 тыс. км³/год. Сток России – примерно в 10 раз меньше. Первое место по ресурсам речного стока занимает Южная Америка, далее следует Зарубежная Азия, Северная Америка. Наименьшими ресурсами располагают Австралия с Океанией и Зарубежная Европа. Мировое водопотребление с учетом дополнительного испарения с водохранилищ на уровне 2020 г. близко к 4500 тыс. км³/год, безвозвратный расход – к 2500 тыс. км³/год, а объем сточных и возвратных вод несколько превышает 2000 км³/год.

По величине полного водопотребления Зарубежной Азии принадлежит первое место (более 2950 км³/год, около 62% мирового водопотребления – от 4500 км³) особенно велика ее доля (67%) в безвозвратном водопотреблении за счет главного водопотребителя – орошаемого земледелия. Доля России в мировом водопотреблении невелика (62 км³ полного, около 30 км³ безвозвратного или соответственно 1.4 и 1.2%). Наибольшая нагрузка на водные ресурсы, то есть сопоставление показателей водопотребления и стока, имеет место в Зарубежной Азии. Относительно велика она также в Зарубежной Европе. Россия в целом отличается незначительной нагрузкой на общие водные ресурсы, что не устраняет наличие водных проблем в отдельных, преимущественно ее южных районах.

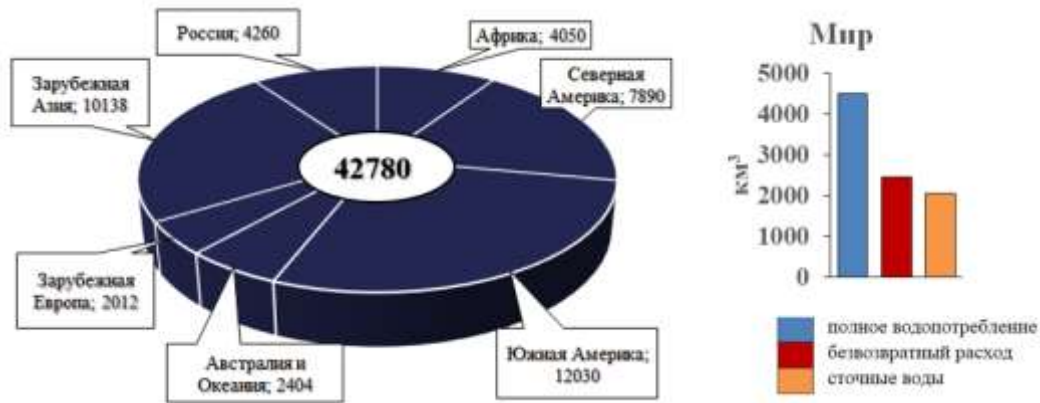


Рис. 1. Средние многолетние ресурсы мирового речного стока, мировое водопотребление и его структура (км³/год)

Более детально распределение стока и водопотребления по территории суши Земного шара представлено на рис. 2

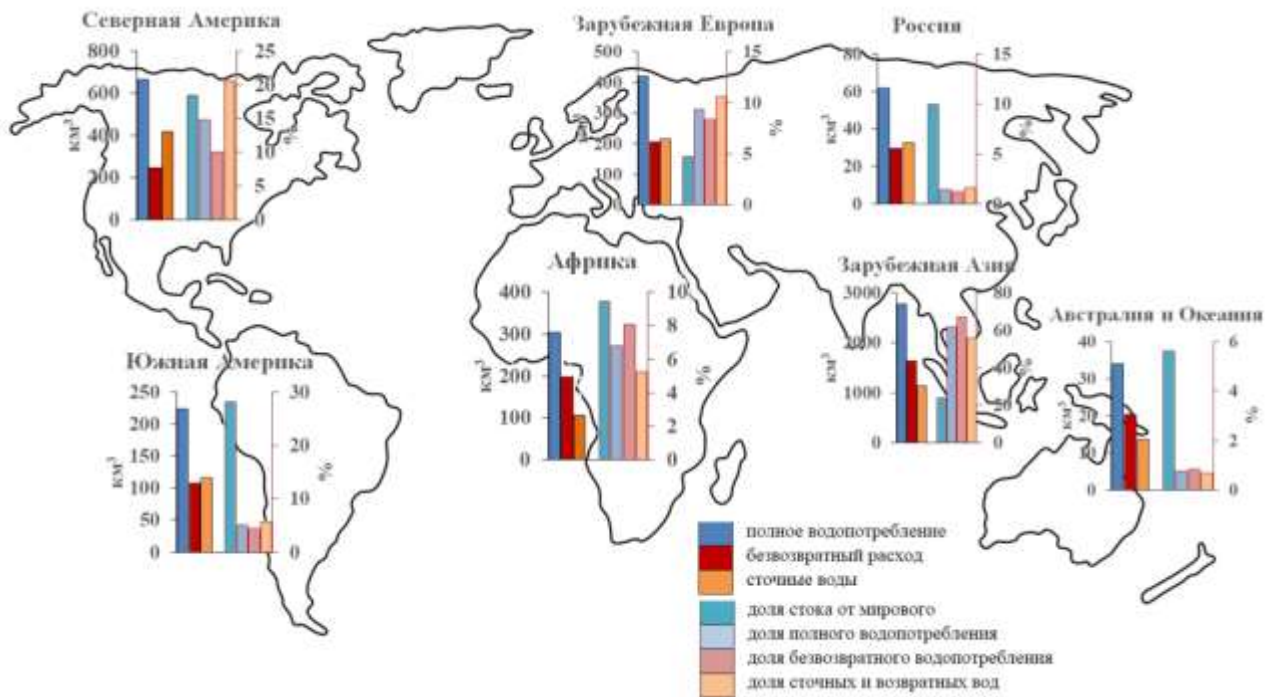


Рис. 2. Доля стока континентов и России в % от мирового и величина и доля этих территорий в полном мировом водопотреблении, безвозвратном расходе, объеме сточных и возвратных вод

С 1900 по 2021 г., то есть за 120 с лишним лет, полное водопотребление в мире возросло в 8 раз, безвозвратное в 6 раз и соответственно объем сточных и возвратных вод, находимый по разнице полного и безвозвратного водопотребления, более чем в 10 раз. Но в последнее время этот рост замедлился и в настоящее время практически отсутствует, а в отдельных странах, например в США, Франции водопотребление снижается. Уменьшение водопотребления отмечалось вплоть до последнего времени и в России (с 1990 г., времени наибольшего антропогенного воздействия, до 2015 г. почти в два раза). Но если в указанных

выше странах, это снижение обусловлено мерами по экономии воды, то в России обусловлено экономическим кризисом, связанным с распадом СССР.

В водохозяйственных расчетах практически не учитывается вода, содержащаяся и перемещаемая в составе продукции. Мы попытались устранить этот пробел. Так, вода, изымаемая и транспортируемая при использовании ресурсов биологического происхождения (зерно, овощи, фрукты, молоко, мясо, древесина) составляет в мире около $4 \text{ км}^3/\text{год}$, а в России – немногим более 0.1 км^3 . Объем воды, изымаемой и транспортируемой при добыче полезных ископаемых оценивается, соответственно, в 2 км^3 и $0.1 \text{ км}^3/\text{год}$. То есть, реально в составе продукции перемещается сравнительно небольшой объем воды в сравнении с тем объемом, который учитывается в водохозяйственных расчетах. Но в отдельных районах с перемещением воды в составе продукции следует считать, тем более что для производства этой продукции требуется гораздо больше так называемой «виртуальной» воды. Выращивание 1 ц зерна пшеницы требует около 150 м^3 воды. В пересчете на производимое в мире зерно это составит около $4600 \text{ км}^3/\text{год}$ и соответственно для России – около $230 \text{ км}^3/\text{год}$.

Долгое время основной причиной загрязнения рек и водоемов считали сточные воды, а одним из главных показателей – кратность их разбавления речным стоком. По этому показателю наиболее неблагоприятная ситуация складывается в Европе и Азии, где кратность разбавления немногим более 10 раз, а в наиболее обжитых их частях – еще меньше при среднем для мира 20 раз. Однако, в последнее время появился ряд работ, в которых доказывается, что одной из главных, если не главную роль, играет диффузное загрязнение в виде выноса в водные объекты загрязняющих веществ со стоком с водосборов, в первую очередь, с сельскохозяйственных полей и урбанизированных территорий, а кратность разбавления сточных вод не всегда дает верную оценку качественного состояния водных ресурсов.

Нами с участием К. В. Лукьянова выполнена оценка соотношения загрязнений, содержащихся в сточных водах, с выносом загрязняющих веществ с речным стоком к замыкающим створам со всей водосборной территории. Оказалось, что вклад загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах в общем их речном выносе незначителен (доли процентов или начальные проценты) от общего выноса их речным стоком к замыкающим створам. Ведущую роль в большинстве случаев в формировании стока растворенных, в том числе загрязняющих, веществ, видимо, играют другие источники, в первую очередь, скорее всего, диффузный сток с водосборов, воды которого имеют повышенное содержание ряда ингредиентов не только антропогенного, но и природного происхождения.

Выше затронуты лишь некоторые актуальные аспекты водохозяйственных расчетов в мире и в России. Несомненно, требуется их дальнейшее уточнение и развитие.

Работа выполнена в рамках Государственного задания FMWS-2026-0003 (1025030300154-4)

Список литературы:

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.

Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Зайцева И.С. Эколого-экономические показатели антропогенных воздействий на водные ресурсы в России и в мире // Вестник РАН. 2020а. Т. 90. № 8. С. 48–57. DOI: 10.31857/S0869587320080071

Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Мельник К.С. Влияние урбанизированных территорий на мировой речной сток // Изв. РГО. 2020б. Т. 152. № 5. С. 58–67. DOI: 10.31857/S086960712005002X

- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Вода и человек. М.: Издательство «Перо», 2022а. 324 с.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Оценка современного водопотребления в мире и на континентах, его влияние на годовой речной сток // Вестник Российской академии наук. 2022б. Т. 92. № 3. С. 256–264. DOI: 10.31857/S0869587322030057.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С., Мельник К.С. Оценка влияния урбанизации на годовой сток и качество вод в мире и на континентах // Изв. РАН, сер. географ. 2022в. Т. 86. № 3. С. 470–480. DOI: 10.31857/S2587556622030098
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Антропогенные воздействия на мировые водные ресурсы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024а. № 2. С. 67–79. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-67-79.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С., Черногаева Г.М. Несбывшиеся прогнозы, планы и проекты в области воздействия на водные ресурсы // Вестник Российской академии наук. 2024б. № 5. С. 449–489. DOI: 10.31857/S0869587324050067.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С., Кашутина Е.А. Антропогенное перемещение воды по территории и во времени // Вестник РАН / Herald of the Russian Academy of Sciences. 2026. Том 96. № 6. С. 547–554. DOI:10.7868/S3034520026060063
- Львович М.И. Элементы водного режима рек земного шара. М.: Гидрометеиздат, 1945. 126 с.
- Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448с.
- Львович М.И. Вода и жизнь: Водные ресурсы, их преобразование и охрана. М.: Мысль, 1986. 256 с.
- Львович М.И., Карасик Г.Я., Братцева Н.Л. и др. Современная интенсивность внутриконтинентальной эрозии суши и земного шара; Междувед. геофиз. ком. при Президиуме АН СССР. М., 1991. 336 с.
- Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеизд, 1974. 638 с.

СЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подсекция 1.1. Методы оценки элементов водного баланса

УДК 504, 551, 556

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕОРИИ К. ХАССЕЛЬМАННА ПРИ СВЕРХДОЛГОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РЕЧНОГО СТОКА

Добровольский С.Г.¹, Юшков В.П.^{1,2}, Соломонова И.В.¹, Юшкова О.В.^{1,3}

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

²Физический факультет МГУ, Москва, Россия

³Механико-математический факультет МГУ, Москва, Россия

sgdo@bk.ru

Аннотация. С использованием теории Хассельманна получены оценки диапазонов ошибок сверхдолгосрочных прогнозов глобальной температуры T , значительно превосходящие соответствующие оценки IPCC. Путем пересчета через диапазоны неопределенности T рассчитаны ошибки прогнозов стока характерных рек севера Евразии и Северной Америки и юга Евразии, которые существенно превосходит обычно фигурирующие в литературе.

Ключевые слова: глобальные изменения климата, речной сток, прогнозы

В настоящей работе авторы делают попытку, при расчетах интервалов неопределенности прогнозов стока, “обойти” часть проблем при использовании в прогностических целях климатических моделей. А именно: вместо оценивания для каждой участвующей в прогнозах климатической модели корректирующих параметров, устраняющих, да и то не полностью, смещенность и модельный дрейф, а также вместо разработки для каждой модели критериев отбора или взвешивания (в общей сложности для всех моделей это десятки или сотни параметров) предложено оценить один, вытекающий из теории климата К.Хассельманна, “универсальный” параметр (стандарт ежегодных приращений средней глобальной температуры) неопределенности прогнозов естественной изменчивости климата, которая и вызывает неопределенность сверхдолгосрочных прогнозов климата и речного стока.

За счет использования в работе большого количества (39) климатических моделей проекта СМIP-6 отпадает необходимость осреднения результатов прогнозирования матожиданий стока по продолжительным отрезкам времени. Осреднение по большому количеству моделей уже эффективно подавляет высокочастотную составляющую прогнозов и дает проекции климатических и гидрологических характеристик на последующие десятилетия, позволяя представить их непрерывными, достаточно простыми аналитическими функциями.

Если предположить, что выявленный для последних десятилетий XX в. и на протяжении XXI века детерминированный тренд глобальной температуры имеет своей причиной парниковый эффект, то вероятностный прогноз глобальной приповерхностной температуры можно представить в аддитивном виде: $T(t) = T_{\text{WIENER}}(t) + T_{\text{GREENHOUSE}}(t)$, где $T_{\text{WIENER}}(t) = T_{\text{WIENER}}(t-1) + a(t)$. Здесь T – глобально осредненная среднегодовая температура воздуха у поверхности; t – время в годах, $T_{\text{WIENER}}(t)$ – дискретный винеровский процесс, описывающий естественные изменения глобальной температуры в соответствии с теорией К.Хассельманна (Hasselmann, 1976; Dobrovolski, 2000); $T_{\text{GREENHOUSE}}(t)$ – антропогенная составляющая изменений глобальной температуры; $a(t)$ – стационарная

последовательность некоррелированных по времени случайных величин (в первом приближении гауссовских) с нулевым матожиданием.

В соответствии с приведенной моделью стандартное отклонение для прогнозируемого значения глобальной температуры в год t равно: $\sigma [T(t)] = \sigma_a(t - t_0)^{1/2}$, где σ_a – стандартное отклонение белого шума a ; $(t - t_0)$ – заблаговременность прогноза. Последнее уравнение дает простой метод оценки диапазонов неопределенности для прогнозов глобальных температур, основанных на сценариях эмиссии парниковых газов. При этом мерой неопределенности в первом приближении может служить стандарт σ_a ошибок климатических прогнозов, возникающих вследствие естественных изменений климата.

Для иллюстрации, на рис. 1 показаны прогнозы глобальной температуры из последнего отчета IPCC (IPCC, 2023) в сочетании со среднеквадратичными ошибками соответствующих прогнозов, полученными авторами статьи. В качестве оценки σ_a бралась средняя по 63 моделям величина среднеквадратичных значений белого шума для последних 40-летних сегментов рядов, равная $0.138^\circ\text{C}/\text{год}$. Эта величина близка к аналогичной, оцененной по наблюдаемому ряду температур NOAA (NOAA, 2025): $0.135^\circ\text{C}/\text{год}$ – разница составляет всего $0.003^\circ\text{C}/\text{год}$, что находится в пределах ошибки оценки.

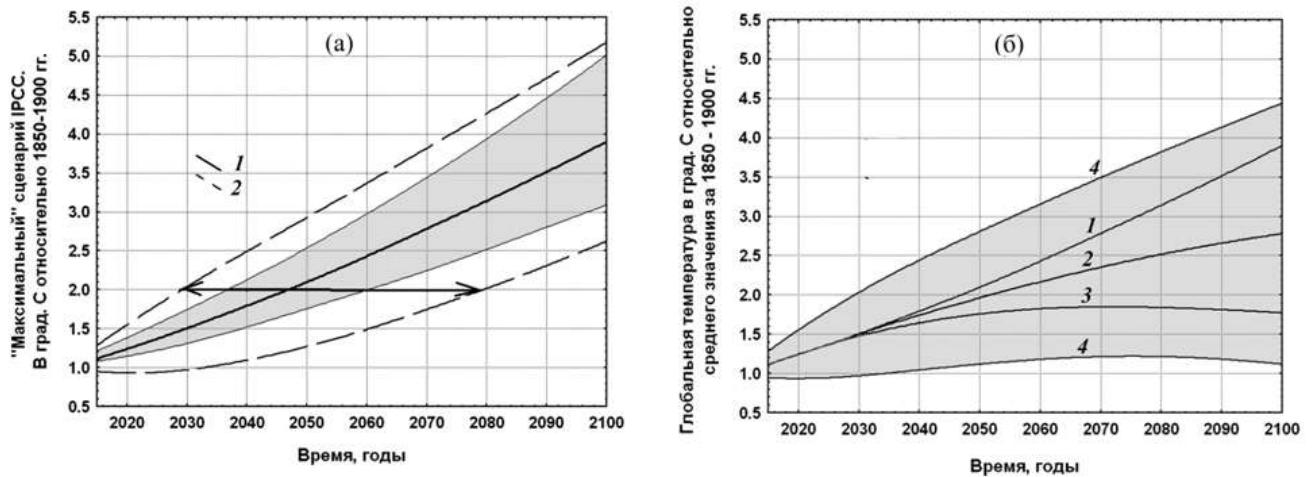


Рис. 1. (а): прогноз изменений средней глобальной температуры в соответствии с основным “высоким” (SSP3-7.0) сценарием IPCC. (1) – прогнозы матожиданий, серым цветом отмечены среднеквадратичные отклонения от средних прогнозируемых значений (и то, и другое построено по данным отчета (IPCC, 2023); (2) – среднеквадратичные отклонения, построенные авторами с использованием теории К.Хассельманна (стрелки соответствуют “критичному” росту температуры на 2°C). (б): прогнозы матожиданий глобальной температуры (IPCC, 2023) в соответствии с “высоким” (1), “промежуточным” (SSP2-4.5) (2), “низким” (3) сценариями эмиссии парниковых газов. (4) – среднеквадратичные ошибки прогноза для “промежуточного” сценария IPCC, построенные авторами с использованием теории К.Хассельманна и с учетом ошибок вследствие разницы между сценариями эмиссии парниковых газов.

Из рис. 1а видно, что рассчитанные среднеквадратичные диапазоны прогнозируемых оценок значительно превосходит диапазоны, представленные в последнем официальном отчете (IPCC, 2023). Для “высокого” сценария разница составляет от ~ 2 раз вплоть до середины века и до 1.5 раз для второй половины века. Для “низкого” сценария разница соответственно от 2 до 2.5 раз.

На рис. 1б предложенные авторами интервалы неопределенности для “среднего” варианта IPCC построены в виде суммарных среднеквадратичных значений соответствующих ошибок прогноза вследствие как естественных, так и антропогенных (парниковых) изменений климата, при этом в качестве меры последних принята половина диапазона между

матожиданиями прогнозов по “высокому” и “низкому” сценариями. Также, ошибки вследствие двух названных причин приняты некоррелированными друг с другом.

Близость к линейному прогнозов среднего годового стока характерных рек севера Евразии и Северной Америки (и ряда рек тропической зоны), расходы которых наиболее чувствительны к изменениям глобального климата, а также близость к линейному прогноза глобальной температуры в соответствии со “средним” сценарием (рис. 1б) позволяют, в первом приближении, рассчитать зависимость стока от глобальной температуры в виде простейшей линейной функции. Пользуясь этой зависимостью, можно также пересчитать диапазоны неопределенности прогнозов глобальной температуры (рис. 1б) в диапазоны неопределенности годового стока реки.

На рис. 2 в качестве примера показаны результаты соответствующих расчетов для Лены, Индигирки, Макензи и Ганга. Изменения матожиданий стока рассчитаны с использованием результатов 39 моделей климатической системы проекта CMIP-6 (линии 1); очевидно, что для всех рассматриваемых рек линейные функции (2) являются хорошим приближением. Пунктирными линиями показаны среднеквадратичные интервалы неопределенности, оцененные путем пересчета соответствующих интервалов для прогнозов средней глобальной температуры – рис. 1б, линии (4) – в интервалы неопределенности для стока. Необходимо обратить внимание на то, что указанным образом прогнозируется “низкочастотная” составляющая потенциальных изменений среднего годового стока, то есть, те изменения, которые связаны с парниковым эффектом и с естественными изменениями глобального климата. При этом за счет осреднения по большому числу моделей климатической системы, позволяющей линеаризацию результатов, отфильтровывается “высокочастотная” составляющая будущих изменений в 21 в. – вследствие межгодовых колебаний стока. Последние, в свою очередь, имеют причиной скорее локальные и региональные изменения в процессах осадкообразования и эвапотранспирации, природа которых существенно отличается от природы изменений глобального масштаба.

На рис. 2а, б, в показаны также среднеквадратичные диапазоны неопределенности прогнозов стока, оцененные по данным работы (Nasonova et al., 2022). Полученные авторами интервалы неопределенности существенно превосходят оценки работы (Nasonova et al., 2022), как и оценки, полученные в других аналогичных исследованиях, основанных, как правило, на использовании результатов меньшего количества моделей климата.

Одним из результатов работы было построение карт пространственного распределения среднегодового слоя стока в пределах соответствующих речных бассейнов – для каждого из календарных лет 21 века. Эти карты свидетельствуют, в первом приближении, о близости полей изменения прогнозируемого стока к автомодельному типу.

Так, на рис. 3 в качестве примера показаны карты слоя стока в пределах бассейна Лены – для начала прогнозного периода и для конца 21 века. Очевидно, что области пониженного и повышенного слоя стока с течением времени примерно сохраняют свои очертания, при этом наблюдается суммарное увеличение водности. Указанные результаты свидетельствуют о том, что аналогичные приведенным выше расчеты диапазонов неопределенности прогнозов стока могут быть осуществлены и для отдельных, меньших по площади, частей крупных речных бассейнов.

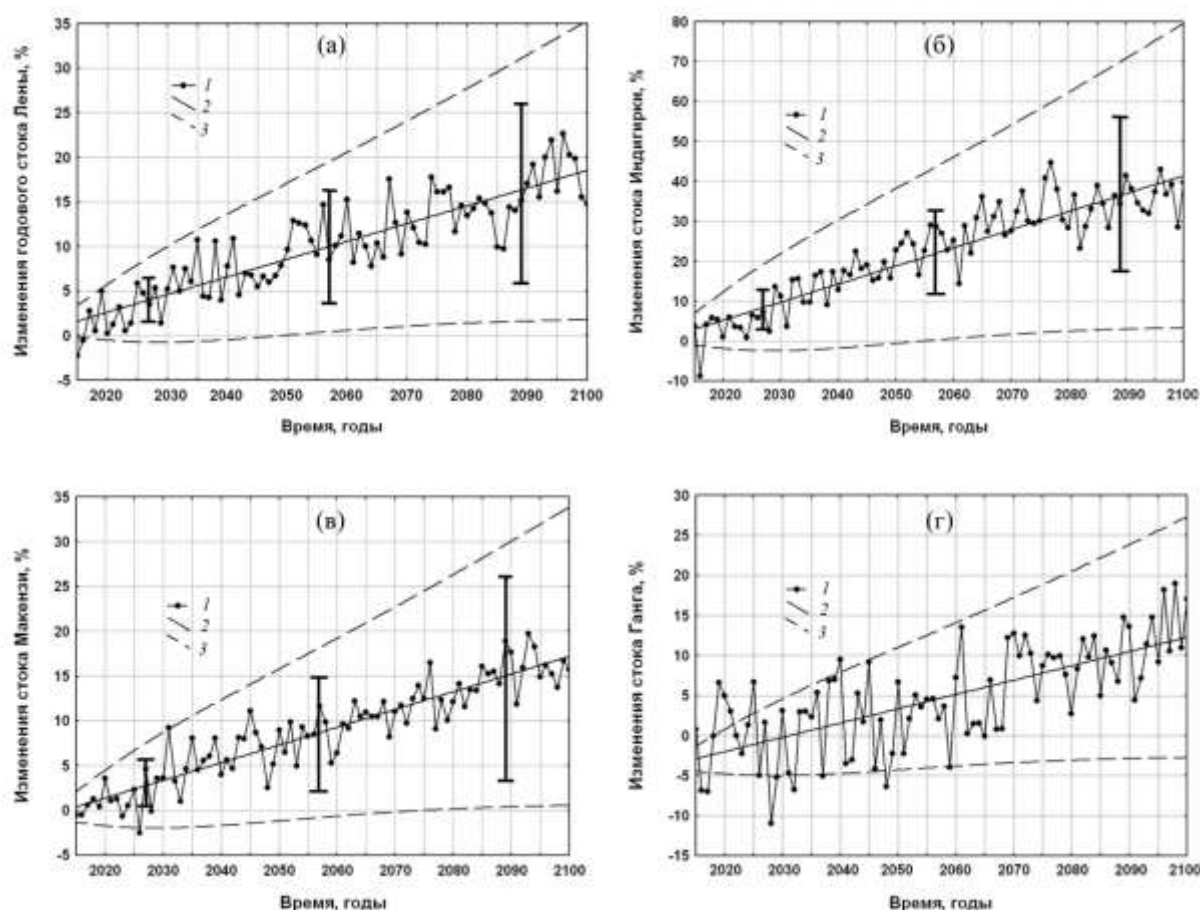


Рис. 2. Прогнозы длиннопериодных (с подавлением межгодовой изменчивости) изменений стока рек: Лены (а), Индигирки (б), Макензи (в), Ганга (г). (1) – прогнозные значения, осредненные по 39 моделям проекта CMIP-6; (2) – линеаризованный прогноз; (3) – значения среднеквадратичных ошибок прогноза, полученные авторами. Вертикальными отрезками обозначена ширина среднеквадратичных диапазонов неопределенности прогнозов из работы (Nasonova et al., 2022).

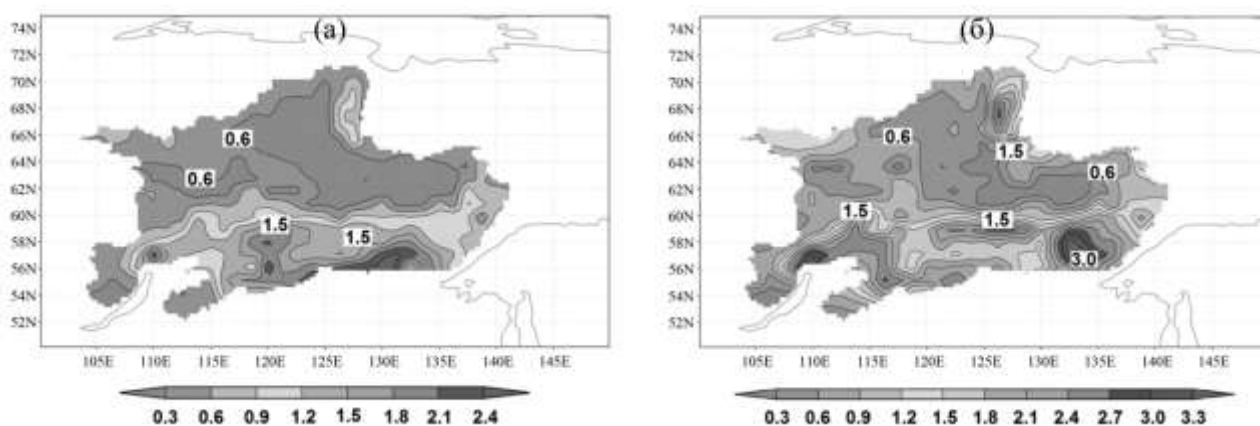


Рис. 3. Прогностические карты пространственного распределения слоя среднего годового стока в пределах бассейна Лены в начале периода прогнозирования (а) и в конце 21 века (б). Модель CMCC-ESM2. “Средний” сценарий эмиссии парниковых газов SSP2-4.5. Величины слоя стока в легендах в мм/сут.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы № FMWZ-2025-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы:

Dobrovolski S.G. Stochastic climate theory. Heidelberg, Berlin et al.: Springer, 2000. 282 p.

Hasselmann K. Stochastic climate models. Part I. Theory // Tellus. 1976. VOL. 28. P. 473–485.

Nasonova O.N., Gusev Ye.M., Kovalev E.E. Climate Change Impact On Water Balance Components In Arctic River Basins // Geography, Environment, Sustainability 2022. VOL. 4. No. 15. P. 148–157. DOI:10.24057/2071-9388-2021-144/

NOAA [Электронный ресурс]. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/> (дата обращения: 09.01.2025).

УДК 556.043

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА Р. ОБЬ И ИХ ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Агафонов Л.И., Гурская М.А.

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия,
lagafonov@ipae.uran.ru

Аннотация. Сток р. Обь, как компонент гидрологического цикла Западной Сибири, характеризует климатические особенности этой территории. Инструментальных наблюдений, по причине их ограниченности во времени, недостаточно для объяснения долговременных изменений. Косвенные источники, такие как древесно-кольцевые хронологии могут быть полезны для интерпретации гидролого-климатических условий территории.

Ключевые слова: сток р. Обь, климат, древесно-кольцевые хронологии, интерпретация

Бассейн р. Обь (2990 тыс. км²) занимает большую часть Западной Сибири и он четвертый по площади после бассейнов рр. Амазонка, Конго и Миссисипи. Пойма р. Обь крупнейшая в Северном полушарии, ее площадь в нижнем течении 20.8 тыс. км², ширина – до 60 км, а суммарный объем аккумуляции воды в пойме в годы наибольшей водности достигает 101.2 км³ (Ландшафтно-гидрологические..., 1989). Продолжительность затопления поймы может длиться до 130 дней (1947, 1979 гг.), а максимальный уровень половодья над уровнем средней многолетней межени периода открытого русла достигать 7 м в Салехардском и 12 м в Октябрьском природных пойменных районах (Петров, 1979; Ландшафтно-гидрологические..., 1989; Агафонов, 2010). Многолетняя средняя величина годового стока в створе гидрологического поста Салехард варьирует от 394 до 429 км³ в год (Водные ресурсы..., 2008). Основной объем стока приходится на период с мая по октябрь и составляет ~70% от годового стока в обычные годы, и до 90% в годы высокой водности (Государственный..., 1984). Со стоком Оби осуществляется перенос тепла с юга на север (Одрова, 1980), и величина теплового стока зависит от объема стока. В створе гп Салехард в среднем эта величина равна 13500 кДж/год (Магрицкий, 2009). Сток Оби влияет на местный климат. Выделяются три периода влияния речного стока на температуру атмосферного воздуха над акваторией поймы и сопредельных территорий: отепляющий эффект стока на температуру воздуха в мае; охлаждающий эффект в июне–августе; отепляющий в сентябре–октябре (Агафонов, Мазепа, 2001). Помимо этого, обские воды обеспечивают эмиссию тепла в почвы поймы. Фильтрационный поток воды и тепла из рек в почвы изменяет термический режим почв. Это влияние наиболее значимо в северных областях, определяя теплоперенос в них (Бойнов, 1975).

Перечисленные особенности стока р. Обь влияют на экосистемы поймы и сопредельных с ней, а все многообразие влияния гидрологического режима реки можно представить тремя группами (Агафонов, 2008): 1 – прямое влияние при затоплении и/или подтоплении, обусловленное высотой, длительностью и колебаниями уровней воды в половодье; 2 – дренаж и эмиссия тепла из реки в берег ведет к изменению термического режима почв и формированию благоприятных условий для растительных сообществ, что особенно важно в регионах с многолетней мерзлотой. 3 – влияние обского стока на местный климат над акваторией поймы и сопредельных с ней территорий.

Один из важнейших компонентов экосистем речной долины р. Обь – это древесная растительность. Использование древесно-кольцевых хронологий для индикации и реконструкции климатических и гидрологических условий прошлого известно и широко используется (Schweingruber, 1996). Для нижнего течения р. Обь (рис. 1) выполнены исследования по индикации влияния и реконструкции факторов гидрологического режима

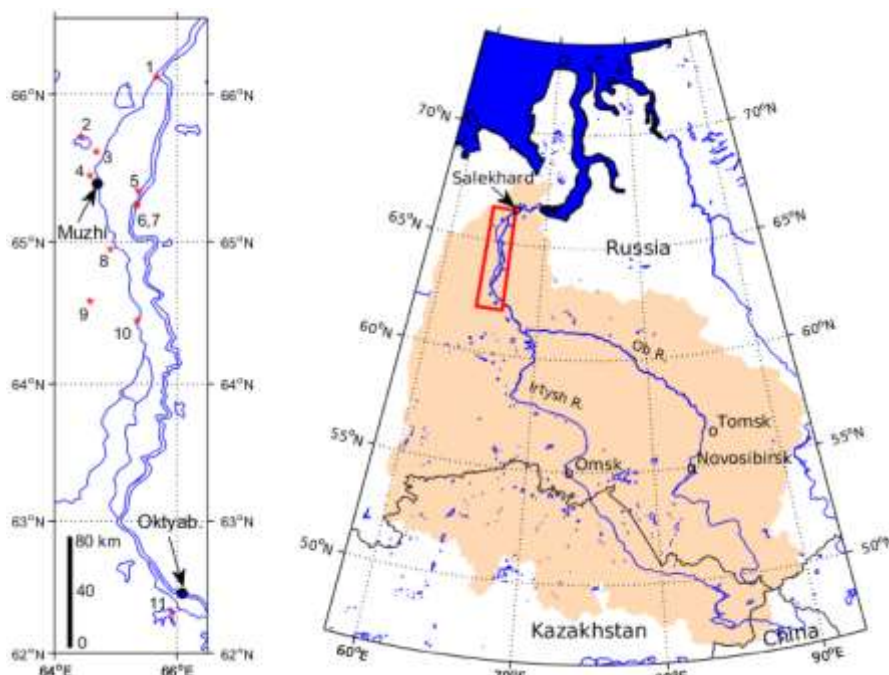


Рис. 1. Район нижнего течения р. Обь, где проводились исследования (по: Agafonov et al., 2016)

Оби на основе древесно-кольцевых хронологий хвойных и лиственных деревьев, основных лесообразователей в регионе (Agafonov, Gurskaya, 2013; Agafonov et al., 2016).

Использование хронологий по анатомической структуре годичных колец деревьев позволяет устанавливать точные даты половодий экстремального/катастрофического характера, когда ширина кольца резко снижается или его изменяется клеточная структура (рис. 2).

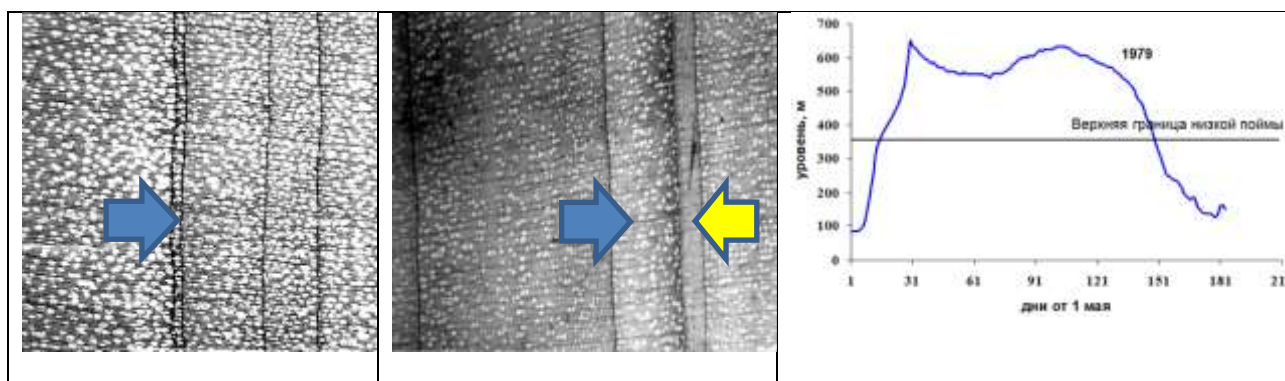


Рис. 2. Строение годичного кольца, сформировавшееся в половодье 1979 г. у ивы белой (слева) и осины (в центре), обозначены синими стрелками. Для осины желтой стрелкой показана аномалия клеточной структуры, сформировавшаяся во второй половине сезона роста в августе на пике половодья во время затопления дерева. Справа – гидрограф суточных уровней воды

На рис. 3 показаны годы формирования годичных колец в годы экстремальных половодий. Если для 1941 и 1979 гг. есть инструментальные наблюдения экстремальности, то для 1914 г. таким свидетельством являются древесно-кольцевые хронологии.

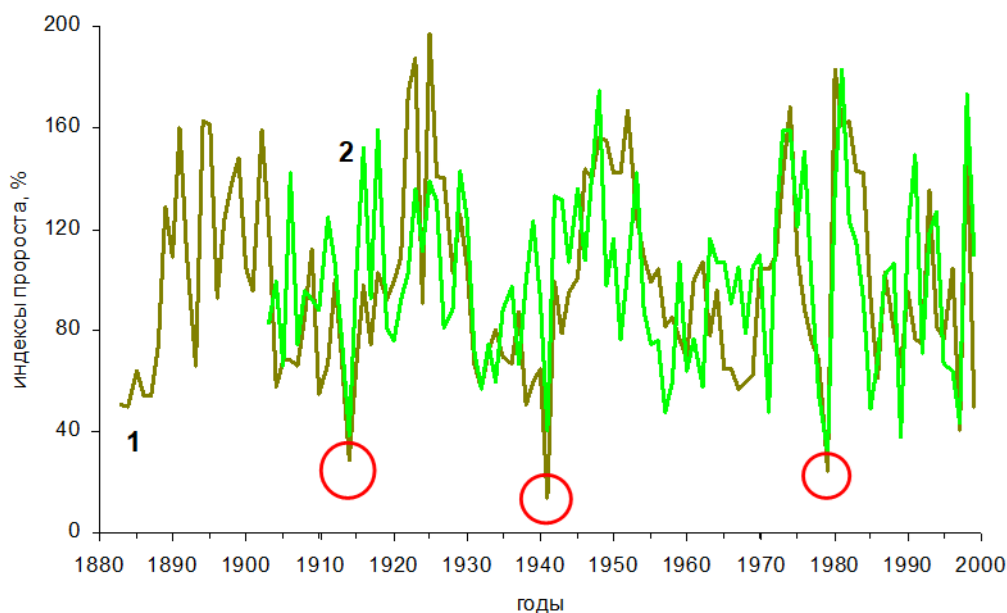


Рис. 3. Обобщенные хронологии индексов прироста ивы белой из Октябрьского пойменного района (1) и ивы шерстистопобеговой из Салехардского пойменного района (2) и годы экстремально высоких и продолжительных половодий 1914, 1941, 1979 (круги)

Поскольку существует зависимость – чем больше объем стока, тем ниже температура атмосферного воздуха над акваторией поймы и сопредельных территорий, тем сильнее эффект влияния температуры на формирование радиального прироста деревьев (Fritts, 1976), этот эффект использовали для реконструкции стока р. Обь за период трехлетних месяцев (рис. 4).

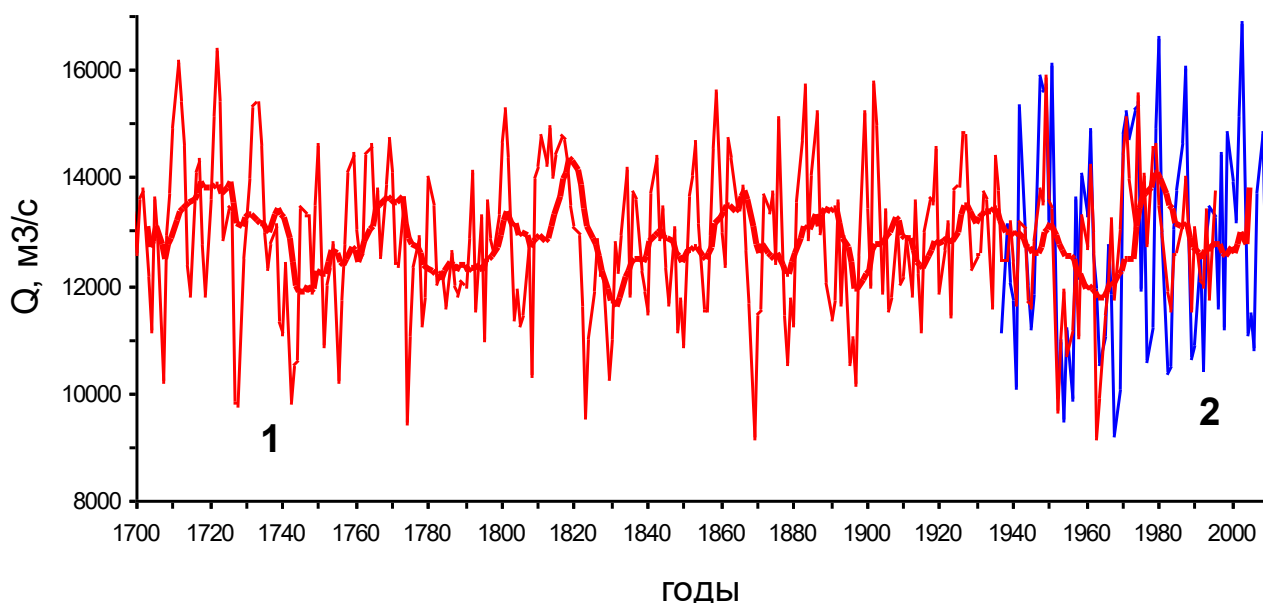


Рис. 4. Реконструкция стока р. Обь для периода июнь-август на основе древесно-кольцевых хронологий (красный цвет) и инструментальные данные (синий цвет). Красная жирная кривая – сглаженные 11-летним фильтром реконструированные значения

Полученная реконструкция удовлетворительно воспроизводит многолетнюю динамику изменений стока р. Обь летних месяцев, но занижает реконструированные значения относительно измеренных расходов воды.

Существует значимый потенциал совершенствования количественных и качественных реконструкций стока р. Обь, а также других элементов гидрологического режима нижнего

течения реки, таких как уровень, длительность половодья, влияние стока на местный климат и компоненты экосистем, на основе древесно-кольцевых хронологий.

Список литературы:

Агафонов Л.И., Мазепа В.С. Сток Оби и летняя температура воздуха на севере Западной Сибири // Изв. РАН. Сер. географ. 2001. № 1. С. 80–92.

Агафонов Л.И. Сток нижней Оби и его изменения в XX столетии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 4. С. 68–76.

Бойнов А.И. Температурный режим и его формирование в пойменных почвах Средней Оби // Почвенный криогенез и мелиорация мерзлотных и холодных почв. М.: Наука, 1975. С. 187–189.

Водные ресурсы России и их использование. / Под ред. И. А. Шикломанова. СПб: ГГИ. 2008. 600 с.

Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1984. Т. 1. Вып. 10: РСФСР. 320 с.

Ландшафтно-гидрологические характеристики Западной Сибири / ред. А. Н. Антипов, Г. В. Бачурин. Иркутск: Ин-т географии СО АН СССР, 1989. 222 с.

Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2009. Вып. 5. С. 69–77.

Одрова Т.В. Изменения теплового стока сибирских рек // Природа. 1980. № 6. С. 90–93.

Петров И.Б. Обь-Иртышская пойма: (типизация и качеств. оценка земель). Новосибирск: Наука. 1979. 136 с.

Agafonov L.I., Gurskaya M.A. The Influence of the Lower Ob River Runoff on Radial Growth of Trees // Contemporary Problems of Ecology. 2013. Vol. 6. No. 7. P. 779–787.

Agafonov L.I., Meko D.M., Panyushkina I.P. Reconstruction of Ob River, Russia, discharge from ring widths of floodplain trees // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 543. P. 198–207.

Fritts H. Tree rings and climate. London; N.Y.; San Francisco: Academic Press, 1976. 567 p.

Schweingruber F.H. Tree rings and environment. Dendroecology. Bern; Stuttgart; Vienna: Paul Haupt Publishers, 1996. 609 p.

УДК 556.5

РАЙОНИРОВАНИЕ РЕК РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ МЕТОДАМИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ И ГЕОСТАТИСТИКИ

Абрамов Д.В.

Московский государственный университет, Москва, Россия

dmbrmv@icloud.com

Аннотация. Представлены результаты районирования территории России по физико-географическим характеристикам и гидрологическому режиму рек. На основе данных 996 гидрологических постов малых и средних рек России и атрибутов HydroATLAS методом k-средних выделено 10 кластеров по ландшафтным параметрам и 10 кластеров по характеристикам стока. Комбинирование двух типов кластеризации позволило получить 16 гибридных классов, учитывающих как физико-географические условия, так и особенности водного режима.

Ключевые слова: гидрологическое районирование, кластеризация водосборов, HydroATLAS, речной сток, малые и средние реки России

Районирование территории по гидрологическим и физико-географическим признакам является важным этапом при разработке моделей для прогнозирования речного стока. Исходными данными послужили ряды среднесуточных расходов воды по 996 гидрологическим постам АИС ГМВО за период 2008–2020 гг. Площади водосборов не превышают 50000 км². Физико-географические характеристики получены из HydroATLAS; из 146 атрибутов отобрано 17, характеризующих морфологию, гидрологические особенности, морфометрию и геологическое строение. Кластеризация выполнена методом k-средних (k=10 для обоих типов районирования). Физико-географическая кластеризация выявила четкую пространственную дифференциацию (рис. 1). Кластер С1 объединяет сельскохозяйственные территории с высокой долей пашен (56%) и глинистых почв. Кластер С3 характеризуется высокогорным рельефом (2021 м), карстовостью (48%) и глубоким залеганием грунтовых вод. Кластер С4 выделяется распространением мерзлоты (53%). Кластер С5 отличается высокой озерностью, С6 – заболоченными низменностями с затапливаемостью 48%.



Рис. 1. Физико-географическая кластеризация водосборов (k=10)

Гидрологическая кластеризация выделила типы водного режима (рис. 2). Кластеры Г1–Г3, Г5, Г9–Г10 характеризуются весенним половодьем (пик в апреле–мае) – Европейская Россия и Западная Сибирь. Кластеры Г4, Г6, Г8 отличаются летним половодьем (июнь), обусловленным муссонным климатом или поздним снеготаянием в условиях мерзлоты. Годовой сток варьирует от 110 мм/год (Г5, степи) до 909 мм/год (Г6, Восточная Сибирь).

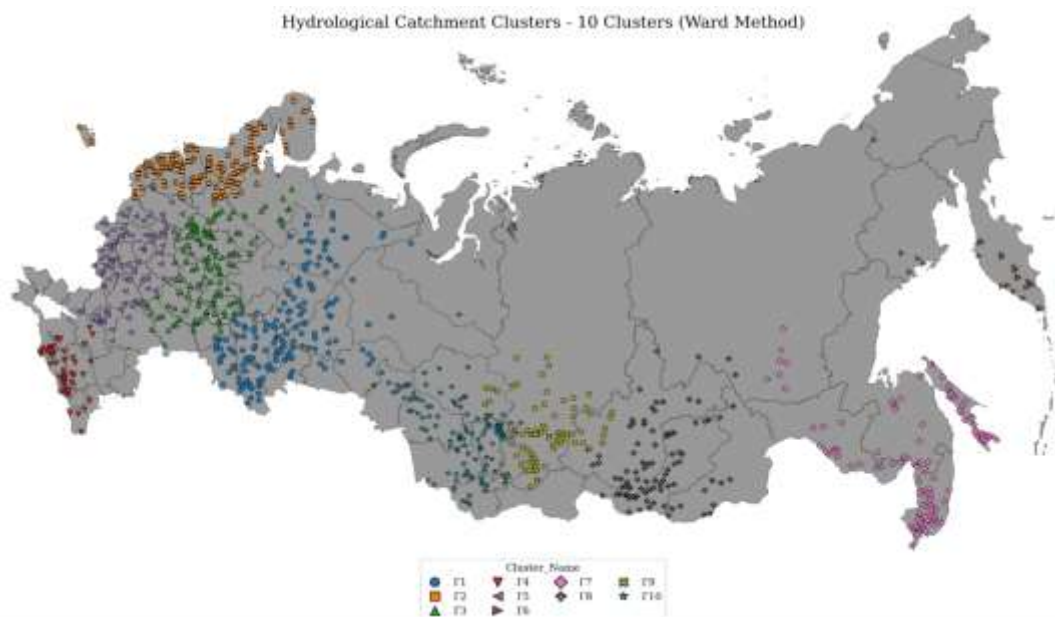


Рис. 2. Гидрологическая кластеризация водосборов (k=10)

Комбинирование физико-географических (Ф) и гидрологических (Г) кластеров позволило выделить 16 гибридных классов (рис. 3). Наиболее представительны: Ф4-Г8 (157 водосборов) – мерзлотные территории с летним половодьем; Ф10-Г3 (119) – лесные водосборы с весенним половодьем; Ф9-Г7 (110) – высоколесистые территории с весенне-летним режимом; Ф1-Г5 (81) – сельскохозяйственные районы с маловодным весенним половодьем. Гибридная классификация обеспечивает согласованность между ландшафтными условиями и типом водного режима.



Рис. 3. Гибридная классификация водосборов (16 классов)

Проведенное районирование выявило региональные различия в физико-географических условиях и гидрологических режимах водосборов России. Доминирующие факторы кластеризации: лесистость, доля мерзлотных территорий, сельскохозяйственная освоенность, геологические условия и озерность. Гибридные классы могут использоваться для стратификации выборки при обучении моделей машинного обучения, что позволит учитывать региональную специфику формирования стока.

Список литературы:

Евстигнеев В.М., Зайцев А.А., Чалов Р.С., Шенберг Н.В. Водный режим рек СССР (карта для высшей школы масштаба 1:8 000 000) // Вестник Московского университета. 1990. Т. 1. № 5. С. 10–16.

Hartigan J.A., Wong M.A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm // J. R. Stat. Soc. Ser. C. 1979. Vol. 28. No. 1. P. 100–108.

Linke S. et al. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution // Sci. Data. 2019. Vol. 6. Art. 283. DOI: 10.1038/s41597-019-0300-6

556.552

ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ, ПЛОЩАДИ И ИСПАРЕНИЯ БЕССТОЧНОГО ОЗЕРА ПРИ СИСТЕМАТИЧЕСКОМ ИЗЪЯТИИ ВОД ЕГО БАССЕЙНА

Бабкин А.В.

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия, abav@mail.ru

Аннотация. Целью работы являются расчеты изменений уровня и связанных с ним площади и испарения с поверхности бессточного озера при сокращении притока в него вод. Они проведены по данным Аральского моря от их значений 1950 годов. Показано, что при большем скачкообразном систематическом изъятии вод его притока море приближается к новому равновесию быстрее, чем при меньшем.

Ключевые слова: бессточное озеро, уровень воды, водный баланс

Расчеты уменьшения уровня, площади и испарения с поверхности Аральского моря были актуальны довольно давно из-за предполагаемого, либо фактически происходящего сокращения притока в него вод. Снижение уровня этого водоема предсказывалось в связи с развитием орошаемого земледелия на водосборах Амударьи и Сырдарьи (Цинзерлинг, 1927).

В этой же работе приводится уравнение водного баланса озера в дифференциальной форме, но делается вывод, что оно и его аналитическое решение слишком сложны для практического применения. Расчеты уменьшения уровня моря при перенаправлении части стока Амударьи в Сарыкамышскую котловину проведены здесь по упрощенной методике с оценкой интервалов времени, за которые уровень моря от его текущего положения будет понижаться на соответствующую величину. Получено, что при ежегодном систематическом изъятии из притока в Аральское море различных по величине объемов вод оно достигнет нового равновесного состояния за время, равное 115–148 лет.

По схожей методике, основанной на арифметическом уравнении водного баланса озера, проводились оценки снижения уровня этого моря при ежегодном систематическом изъятии его вод в объемах, равных соответственно 12 и 19 км³/год (Зайков, 1960). Получено, что при указанных изъятиях притока море приблизится к новому равновесному состоянию через 100 лет. При этом, понижение уровня будет происходить неравномерно. Он будет падать быстро вначале, а затем, по мере приближения моря к новому равновесному состоянию, все медленнее, принимая вид асимптотической кривой.

Получено аналитическое решение дифференциального уравнения водного баланса озера при скачкообразном изменении притока в него вод, постоянном слое видимого испарения и линейной морфометрической зависимости уровня водоема от его площади (Раткович и др., 1973). С учетом этого решения проведены расчеты уменьшения характеристик Каспийского моря при ежегодном систематическом изъятии его притока в объеме 40–80 км³/год (Раткович, 1976). Расчеты выполнены для моря в целом, и отдельно, для южной его части, полагая, что Северный и Южный Каспий могут быть разделены дамбой.

Показано, что море будет приближаться к состоянию нового равновесия за промежуток времени порядка 100 лет. Если падение уровня Северного Каспия будет сдерживаться дамбой, южную часть моря ожидает более длительное по времени и значительно большее по масштабам падение уровня воды.

Для получения аналитических решений уравнения водного баланса озера, полезных при моделировании и прогнозировании его характеристик, оно было лианеризовано (Музылев, 1980). Здесь также указывалось на соответствие исследований их колебаний некоторым задачам из областей механики и радиотехники.

Целью настоящей работы являются расчеты и анализ изменений уровня и связанных с ним площади и испарения с поверхности Аральского моря при ежегодном систематическом изъятии вод его бассейна. Они проведены на основе дифференциального уравнения водного баланса этого водоема при сокращении его притока соответственно на 24, 44 и 64 км³/год.

Изменения характеристик моря отсчитываются от их равновесных значений, соответствующих его уровню 1950 годов – 53.3 м. Ежегодное изъятие 44 км³/год вод Аральского моря примерно равно стоку в него Амударьи, а 64 км³/год – всему объему поступавших в него вод. Эти расчеты позволят установить, в каком случае озеро быстрее приближается к новому равновесию – при большем систематическом изъятии вод его бассейна или при меньшем.

Водный баланс бессточного озера описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{dV}{dt} = P - E, \quad (1)$$

где P суммарный приток вод в озеро, равный сумме поверхностного и подземного стока в него, и атмосферных осадков, выпадающих на его поверхность, E – испарение с акватории озера, V – объем его вод, t – время.

При понижении уровня Аральского моря практически во всем диапазоне его значений до отметки 23.5 м его морфометрическая зависимость от площади водоема практически линейна (Николаева, 1969). Если уровень моря, находящийся выше этой отметки, изменяется на 1 м, его площадь соответственно увеличивается либо уменьшается на величину, примерно равную 2000 км². Было обосновано практическое отсутствие зависимости испарения в размерности слоя от уровня и площади этого водоема (Асарин, 1975). Постоянный слой испарения можно считать его нормой b .

При линейной зависимости уровня озера от площади его акватории и постоянном слое испарения уравнение его водного баланса можно представить следующим образом:

$$k \frac{dS}{dt} = \frac{P}{S} - b, \quad (2)$$

где S – площадь озера, k – коэффициент линейной зависимости уровня моря от его площади.

При скачкообразном уменьшении притока уравнение (2) решается посредством разделения переменных. Его решением будет следующее выражение:

$$t = -\frac{k}{b} \left((S - S_1) + \frac{P}{b} \ln \frac{bS - P}{bS_1 - P} \right). \quad (3)$$

Здесь S_1 площадь озера в момент скачкообразного изъятия какой-либо части либо всего его притока, P – приток, который продолжает поступать в озеро после соответствующего его сокращения.

Выражение (3) позволяет проводить расчеты времени принятия площадью озера того или иного значения при стремлении этого водоема к новому равновесному состоянию. Оно при уменьшении притока на любую величину достигается, когда выражение под логарифмом обращается в 0.

Таким образом, время, за которое характеристики озера станут равными их значениям нового равновесного состояния, при ненулевом притоке всегда составляет бесконечность. Чтобы проанализировать зависимость времени приближения озера к новому равновесию от величины ежегодного систематического изъятия притока вод будем сопоставлять его значения, за которые Аральское море от исходного состояния перейдет к новому на 99%.

При изъятии всего притока вод в озеро второе слагаемое правой части выражения (3) равно 0, и понижение его уровня и связанных с ним характеристик будет происходить линейно. В момент обращения площади озера в 0 – его высыхания, нулю становится равным и выражение под логарифмом. В этом случае второе слагаемое представляет собой неопределенность произведения 0 и бесконечности.

Расчеты по формуле (3) показывают, что при подстановке значений площади Аральского моря в нее порядка 0,01 км², меньших тех, что могут иметь гидрологический

смысл, второе слагаемое ее правой части также равно 0, как и при больших площадях. При полном изъятии притока вод в Аральское море уменьшение его характеристик будет происходить линейно во всем диапазоне его площадей, и оно может быть рассчитано по более простой формуле, которая получается при исключении из выражения (3) тождественно равного 0 второго слагаемого:

$$S = S_1 - \frac{b}{k} t. \quad (4)$$

Время полного высыхания озера, когда его площадь S становится равной 0, может оцениваться следующим образом:

$$t = \frac{k}{b} S_1. \quad (5)$$

На рис. 1 представлены кривые изменения испарения с поверхности Аральского моря при ежегодном систематическом изъятии его притока на величины, равные соответственно 24 км³/год, 44 км³/год, а также 64 км³/год. Время, за которое этот водоем при скачкообразных уменьшениях его притока на 24 и на 44 км³/год приблизится к соответствующим равновесным состояниям на 99%, составило 104.0 года и 67.9 лет.

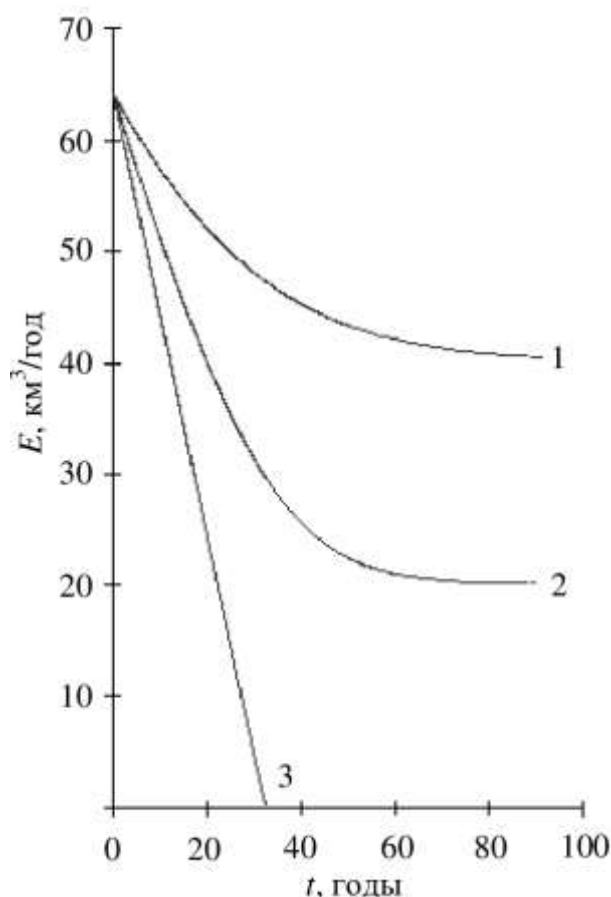


Рис. 1. Изменение испарения Аральского моря при изъятии вод его бассейна от их количества начала 1950 годов: 1 – в объеме 24 км³/год, 2 – в объеме 44 км³/год, 3 – всего притока вод в море

Если приток вод в море изымается не полностью, то подтверждаются вывод (Зайков, 1960), что падение уровня воды озера будет наиболее значительным в первое время после уменьшения его притока. По мере приближения озера к новому равновесию понижение уровня за единицу времени сокращается.

При изъятии всего притока вод в море его новым равновесным состоянием будет полное высыхание. Море пересохнет на 99% – его площадь уменьшится до 640 км² – через 31.7 лет с момента прекращения поступления в него вод. Площадь меньше, чем 1 км², при которой море можно считать полностью высохшим, будет через 32 года.

Таким образом, при большем скачкообразном изъятии воды из ее притока в озеро в уменьшении его характеристик усиливается линейная составляющая, и оно достигает нового равновесного состояния быстрее, чем при меньшем ее изъятии. Быстрее всего море выходит к его полному пересыханию при прекращении поступления в него вод.

Список литературы:

Асарин А.Е. Водный баланс и ожидаемые уровни Аральского моря. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: Институт “Гидропроект” им. С. Я. Жука, 1975. 159 с.

Зайков Б.Д. Очерки по озероведению (вторая часть). Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1960. 240 с.

Музылев С.В. Теоретико-вероятностный анализ колебаний уровня замкнутого водоема // Водные ресурсы. 1980. № 5. С. 21–40

Николаева Р.В. Основные морфометрические характеристики Аральского моря // В кн.: Проблема Аральского моря. М.: Наука, 1969. С. 25–38.

Раткович Д.Я., Жданова И.С., Привальский В.Е. К проблеме уровня режима Каспийского моря // Водные ресурсы. 1973. № 3. С. 45–69.

Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 256 с.

Цинзерлинг В.В. Орошение на Аму-Дарье. М.: Управления водного хозяйства Средней Азии, 1927. 895 с. (Доступно в интернете, дата обращения – 20 декабря 2025 г. <http://www.eccsa-water.net/content/view/2438/24/lang,ru/>).

УДК 556.555.2+551.515.1

ПРИМЕНЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ОЗЕР

Батмазова А.А., Гайдукова Е.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия, *batmazovaa@mail.ru*

Аннотация. Разработаны иерархические прогностические модели формирования уровня режима средних и малых озер Северо-Западного региона России в условиях недостатка исходной информации с использованием аппарата многомерной статистики и воднобалансового подхода с учетом макромасштабных синоптических процессов.

Ключевые слова: уровень режим озер, циклоническая деятельность, физико-статистический воднобалансовый подход

Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью средних и малых озер Северо-Западного региона России. Существующие гидрологические модели ориентированы в основном на крупные, хорошо исследованные водоемы, в то время как для подавляющего большинства озер данные наблюдений фрагментарны или отсутствуют (Тимофеев, 2019). Цель работы – создание иерархических моделей формирования уровня режима средних и малых озер в условиях дефицита исходной гидрометеорологической информации с использованием аппарата многомерной статистики. Иерархический подход подразумевает рассмотрение процесса на двух уровнях: локальном (с точки зрения воднобалансовой теории) и макромасштабном (учет циклонической активности). Объекты исследования – малые и средние (Нежиховский, 1988) озера Северо-Западного федерального округа (табл. 1).

Таблица 1. Объекты исследования.

Водный объект	Бассейн моря	Площадь зеркала, км ²	Зарегулированность
Ведлозеро	Балтийское	58	Сезонное
Лексозеро		166	н/з*
Сандал		185	Сезонное, частично многолетнее
Суоярви		58.5	н/з
Верхнее Куйто	Белое	240	н/з
Ондозеро		182	Сезонное
Пермусозеро		24.2	н/з
Лекшмозеро		54.4	н/з
Ловозеро	Баренцево	208.5	Сезонное, многолетнее
Куэтсьярви		17	н/з, периодически находится в подпоре
Пулозеро		8.62	н/з

* н/з – озеро не зарегулировано

Первая решаемая задача – анализ гидрометеорологической изученности и определение репрезентативных метеостанций. Анализ действующей сети гидрологических наблюдений¹ за озерами позволил сделать вывод о недостаточной обеспеченности исследуемого района инструментальными гидрологическими данными, что свидетельствует о его низкой гидрометеорологической изученности.

¹ Водный кадастр Российской Федерации. Каталог пунктов озерной гидрологической сети Росгидромета в 2023 году: справ. изд. СПб.: РИАН, 2024. 59 с.

Одним из вариантов решения этой проблемы является полуавтоматический экспертный подбор репрезентативных метеорологических станций к исследуемым озерным и речным гидрологическим постам. Для автоматизации процесса, основанного на понятии «радиуса репрезентативности»², была разработана программа³, формирующая первичный список станций в заданном радиусе (рис. 1), после чего производилась проверка наличия необходимых исходных данных и анализ однородности физико-географических условий.

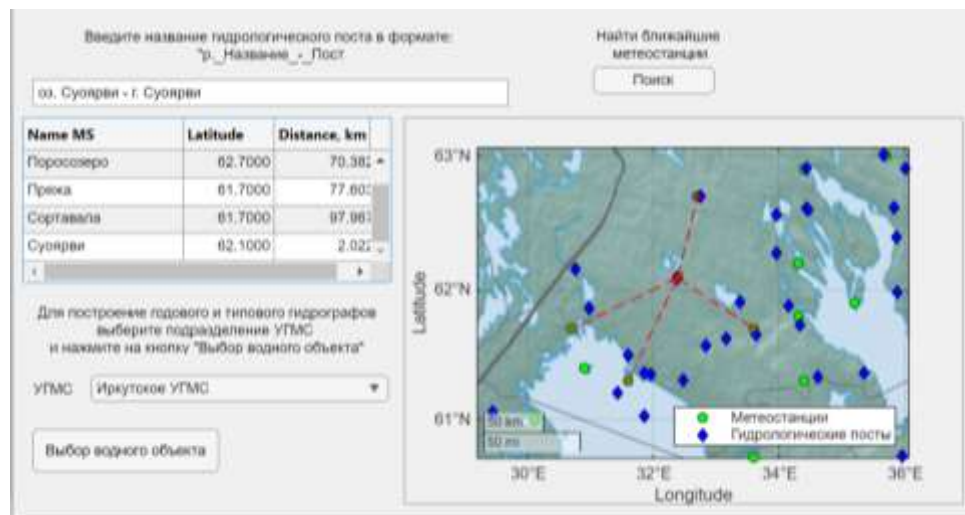


Рис. 1. Пример работы авторской программы по определению репрезентативных метеорологических станций

В результате работы программы, а также после корреляционного анализа и осреднения данных по отобранным станциям для каждого озера был сформирован окончательный перечень репрезентативных метеостанций.

Вторая задача заключалась в определении альтернативных атмосферным осадкам и испарению предикторов для моделирования приходной и расходной составляющих водного баланса. В основе лежал физико-статистический воднобалансовый подход, заключавшийся в представлении элементов уравнения водного баланса как элементов уравнения линейной регрессии (Бефани, 1958), что позволило выразить неизвестные составляющие водного баланса по концептуальной иерархической схеме. В рамках этой иерархии ключевое внимание уделяется атмосферным осадкам и испарению. Для установления причин их формирования и компенсации нехватки данных производится разложение этих характеристик на связанные с ними метеоэлементы (Gunawardhana, Al-Rawas, 2017) – влажность, давление, облачность и температура воздуха, дефицит насыщения водяного пара, скорость ветра соответственно. Все это в итоге приводит к общему макромасштабному, а не локальному знаменателю – циклонической активности. Статистический элемент описываемого подхода заключался в поэтапном исключении предикторов посредством оценки мультиколлинерности с помощью метода графов (авторская программа, рис. 2), нагрузки факторов (стандартизированный коэффициент регрессии β), уровня значимости (критерий p -level). В результате описанных действий для каждого исследуемого озера был определен свой набор альтернативных атмосферным осадкам и испарению предикторов, которые в дальнейшем проходили процедуру стандартизации для вывода моделей:

² Свод правил СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99* Строительная климатология. М.: Минстрой России, 2020. 234 с.

³ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025691843 Российская Федерация. Программа для анализа гидрометеорологических данных («HMDistance»): № 2025689164/69; заявлено 23.10.2025; внесено в Реестр программ для ЭВМ 18.11.2025 / Батмазова А.А., Гайдукова Е.В., Захаров И.Д.; правообладатель ФГБОУ ВО ИГМУ.

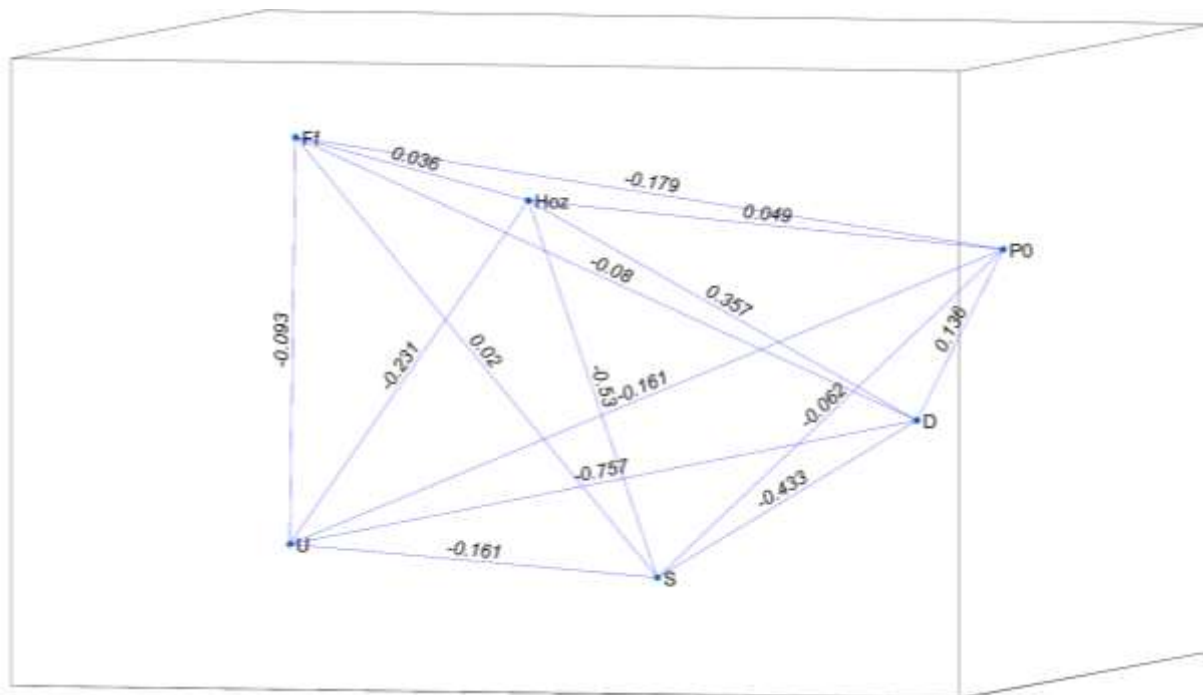


Рис. 2. Пример корреляционного графа для оценки связи между гидрометеорологическими величинами оз. Верхнее Куйто

- уровень воды всех имеющихся у озер притоков $H_{пр}$;
- уровень воды вытекающих из озер рек $H_{от}$;
- относительная влажность воздуха U ;
- высота снежного покрова S ;
- дефицит насыщения водяного пара d .

На основе отобранных предикторов по данным за период с 2008 по 2021 год были выведены уравнения, позволяющие моделировать уровенный режим озер с оптимальной заблаговременностью (Батмазова, 2025). Апробация проводилась на данных 2022 года. Объясняющая способность полученных моделей (R^2) варьируется в диапазоне 0.44–0.92. Критерии эффективности (ГМЦ и NSE) показали неоднозначные, но удовлетворительные результаты (Симонов, 2023). Графический анализ подтвердил, что модели адекватно воспроизводят динамику фактических уровней, улавливая пики. Наименее однозначные результаты получены для моделей, построенных по суточным данным, что объясняется высокой инерционностью озер.

Третья задача была направлена на использовании макромасштабных процессов с целью увеличения заблаговременности с помощью анализа связи циклонической активности с уровенным режимом малых и средних озер исследуемой территории.

Для этого:

- Выявлялись характерные месяцы: через процедуру ранжирования определялись месяцы с совпадающими грациями циклонической активности, уровней воды в озерах и количества осадков (например, месяцы с минимальными уровнями, осадками и слабой циклонической деятельностью).

- По характерным месяцам и грациям исследовалась связь между тремя парами характеристик: (1) циклоническая активность и уровни воды, (2) циклоническая активность и осадки, (3) осадки и уровни воды. Результаты визуализировались в виде корреляционных графов (рис. 3), а достоверность коэффициентов корреляции определялась по условию $|r|/\sigma_r \geq 2$, которое соблюдается для всех исследуемых озер и изменяется от 2.00 до 3.96.

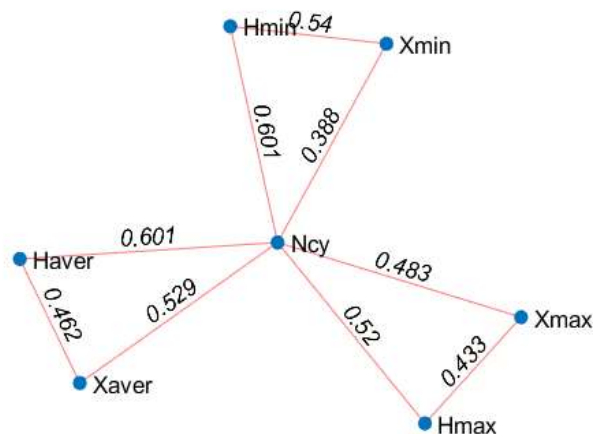


Рис. 3. К анализу связи циклонической активности с уровнем режимом озера: корреляционный граф, оз. Ведлозеро

– Определялись конкретные численные индикаторы циклонической деятельности для прогностической системы. С помощью авторской программы, выполняющей построение комплексных гистограмм, для характерных месяцев подсчитывалась частота стояния пониженного атмосферного давления и высокой влажности, определялись их пороговые значения (рис. 4).

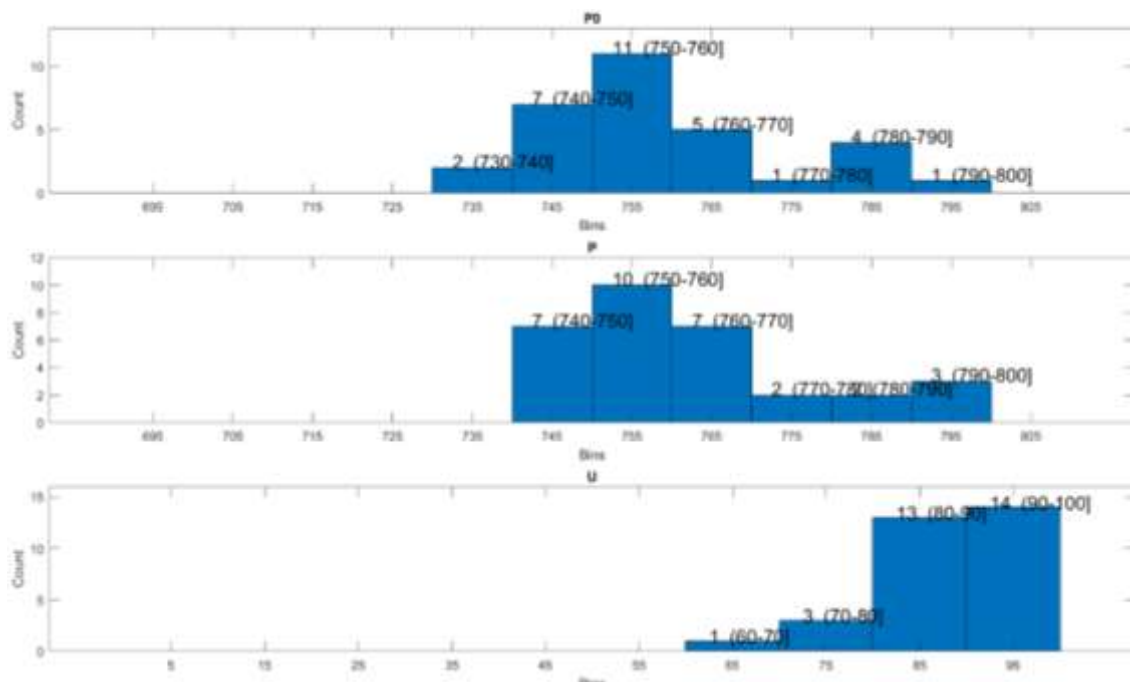


Рис. 4. К анализу связи циклонической активности с уровнем режимом озера: комплексная гистограмма за январь 2008 г., метеостанция Кондопога

Выводы:

1. Для решения проблемы недостатка исходных гидрометеорологических данных района исследования разработан метод экспертного подбора репрезентативных метеостанций и задействован подход, основанный на аппарате множественной линейной регрессии и воднобалансовой теории, позволяющий подбирать альтернативные предикторы для прогностических регрессионных моделей.

2. Получены физически и статистически обоснованные прогностические регрессионные модели.

3. Проанализировано влияние макромасштабных процессов (циклонической активности) на уровень воды в озерах. Обнаружена тесная связь между циклонической деятельностью и уровнями воды исследуемых озёр.

Все описанное выше позволяет сделать вывод о возможности создания иерархических моделей для прогноза уровней воды озёр в условиях недостатка исходной информации, по данным, имеющимся в открытом доступе, с использованием альтернативных атмосферным осадкам и испарению предикторов, а также учитывать процессы более крупного масштаба для повышения адаптационной способности моделей путем увеличения заблаговременности.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSZU-2026-0003).

Список литературы:

Батмазова А.А., Гайдукова Е.В. Построение регрессионных моделей для оценки уровня озёр северо-западной части России // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 151–165.

Бэфани, А.Н. Основы теории ливневого стока: Труды Одесского гидрометеорологического института. Л.: Гидрометеоздат, 1958. 310 с.

Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 183 с.

Симонов Ю.А. Прогнозирование стока рек России: научно-методические основы и практическая реализация: дис. д-р. геогр. наук: 1.6.16. М., 2023. 237 с.

Тимофеев, В.И. Проблемные вопросы обеспеченности гидрометеорологической информацией Арктической зоны России при решении задач ее устойчивого развития // Инновации. 2019. № 5(247). С. 84–92. DOI: 10.26310/2071-3010.2019.16.34.012.

Gunawardhana L.N., Al-Rawas G.A., Kazama S. An alternative method for predicting relative humidity for climate change studies // Meteorological Applications. 2017. Vol. 24. P. 551–559. DOI:10.1002/met.1641.

УДК 556.072

ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКАЯ ВЕРСИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Бородин О.О.¹, Мотовилов Ю.Г.¹, Гельфан А.Н.^{1,2}, Загребав В.Ю.¹

¹Институт водных проблем РАН, *motol49@yandex.ru*

²Московский государственный университет, Москва, Россия.

Аннотация. Пользовательская настольная версия Национальной гидрологической моделирующей системы (НГМС) разработана на базе технологической платформы ECOMAG. Геоинформационный интерфейс построен с использованием некоммерческих программных продуктов с открытым исходным кодом, что обеспечивает цифровой иммунитет и возможности модернизации системы с учетом требований пользователей. Система включает полный набор программных средств и баз данных, необходимый для калибровки и проведения расчетов, что значительно облегчает пользователю трудоемкий этап сбора и подготовки необходимой информации.

Ключевые слова: речной бассейн, математическое моделирование, комплекс ECOMAG, настольная версия НГМС

В последние несколько лет в рамках выполнения Проекта «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» в России создана Национальная гидрологическая моделирующая система (НГМС) для информационной поддержки принятия решений по адаптации водной отрасли экономики РФ к изменению климата (Гельфан и др., 2025). В качестве базовой основы для создания НГМС принята структура созданной в ИВП РАН технологической платформы, включающей вычислительное ядро – физико-математические модели гидрологических процессов с базами данных для задания краевых условий и параметров моделей, а также с геоинформационными и веб-технологиями, обеспечивающими взаимодействие вычислительной платформы с автономными и внешними базами данных.

Вычислительное ядро процессов формирования стока на речных водосборах представляет собой физико-математическую модель ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics), разработанную Ю.Г. Мотовиловым (Motovilov et al., 1999) и ориентированную на описание гидрологических процессов в речных бассейнах со смешанным дождевым и снежным питанием рек. При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется нерегулярной сеткой на отдельные расчетные элементы (элементарные водосборы) с учетом особенностей рельефа и структуры речной сети. Моделирование гидрологических процессов на каждом из расчетных элементов выполняется с суточным шагом по времени по метеоданным для четырех уровней: для приповерхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт Б), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова. Модель воспроизводит гидрографы речного стока в речной сети и динамику полей характеристик гидрологического цикла (снежного покрова, влажности и промерзания почвы, испарения, поверхностного и подземного стока). Указанные возможности позволяют использовать модель как современный инструмент решения разнообразных исследовательских и прикладных задач гидрологии речных бассейнов.

Для удобства проведения расчетов по модели в рамках различных проектов в начале 2000-х годов была разработана компьютерная технология Информационно-моделирующего комплекса (ИМК) ECOMAG, которая включала в себя непосредственно расчетный модуль модели ECOMAG и средства информационной и технологической поддержки работы этого модуля. Детальное описание модели ECOMAG, ее периферии и многочисленные примеры применения ИМК для решения исследовательских и прикладных задач гидрологии суши для речных бассейнов, расположенных в различных регионах мира, с водосборными

территориями от нескольких до миллионов квадратных километров приведены в монографии (Мотовилов, Гельфан, 2018) и сотнях статей различных авторов. В рамках этих исследований были построены региональные гидрологические модели для большинства крупных речных бассейнов России (Гельфан и др., 2025; Калугин, 2023; Крыленко и др., 2025; Мотовилов, Гельфан, 2018; Bugaets et al., 2025; Pavlyukevich et al., 2025 и др.).

25-летний опыт применения комплекса показал, что для его адаптации на новых речных бассейнах пользователь должен обладать навыками работы с геоинформационными системами, а также ориентироваться в широком спектре картографических, гидрометеорологических, водохозяйственных, почвенных и иных информационных ресурсов, их потоков и возможностей получения этой информации. Как правило, начинающий пользователь испытывает определенные трудности на этапе сбора информации и адаптации модели на реальном водном объекте, и нуждается в помощи опытного консультанта. Кроме того, за прошедшие годы геоинформационная система ArcView, на базе которой в ИМК был разработан оригинальный программный модуль Ecomag Extension для схематизации водосбора и речной сети, «морально устарела», а возникшие в последние годы санкционные ограничения предъявляют дополнительные требования и сложности на совершенствование существующей технологии. Поэтому при модернизации геоинформационной подсистемы комплекса в качестве новой среды разработки технологии схематизации речных бассейнов было выбрано геоинформационное приложение MapWindow, являющееся некоммерческим программным продуктом с открытым исходным кодом, который можно модифицировать для внедрения нужных функций (Anselmo, 2006). Разработка новых процедур выполнялась на языке C#. Они были интегрированы в среду MapWindow посредством плагина (расширения) Ecomag, включающего в себя набор специализированных оригинальных программ. Технология позволяет на основе цифровой модели рельефа в автоматическом режиме выделять модельную речную сеть с необходимым пространственным разрешением, оконтуривать водосборные площади притоков и участков русловой сети, проводить структурно-гидрографический анализ речных сетей, осуществлять процедуры наложения различных полей (включая характеристики подстилающей поверхности) на элементарные водосборы, вычислять статистические характеристики пространственных полей и т.д.

Кроме того, в ИМК ECOMAG процедуры управления информационными базами данных и расчетным модулем были написаны с использованием языка программирования Clarion со встроенными средствами управления БД. В силу лицензионных ограничений эти процедуры также были исключены, и в новой настольной версии представлены набором специализированных оригинальных программ, написанных на языке C#.

Таким образом, при разработке модулей управления геоинформационной подсистемой, информационными БД и вычислительным ядром гидрологической модели мы отказались от использования специализированных средств управления лицензионных ГИС ArcView и БД Clarion и ориентировались только на собственные оригинальные программные разработки и свободно распространяемые продукты с открытым исходным кодом на основе универсальной общественной лицензии (GNU). Такие совершенствования и модернизации Информационно-технологической платформы ECOMAG в настольной версии модельного комплекса обеспечивают цифровой иммунитет и определенный суверенитет в области моделирования водных ресурсов

Совершенствование программного обеспечения моделирующей системы ECOMAG и создание на этой основе пользовательской (настольной) версии НГМС имеет целью облегчить начинающему пользователю трудоемкий этап сбора и подготовки необходимой для расчетов информации. Основные виды и источники хранения этой информации описаны в работах (Гельфан и др., 2025; Мотовилов, Гельфан, 2018). Вместе с тем, у многих начинающих пользователей этот этап может отнимать значительное время и нервной энергии, а иногда в силу ведомственной несогласованности становится непреодолимым препятствием. Поэтому при совершенствовании комплекса ECOMAG мы стремились внести в программный комплекс максимальное количество информационных ресурсов в нужных форматах так, чтобы

начинающему пользователю (студентам, молодым специалистам и др.) не было нужды связываться с труднодоступными ведомственными базами данных, организовывать поступление этих данных в нужных форматах для выбранного речного бассейна и т.п. Практически вся информация (по крайней мере для территории РФ) уже включена в базы данных модернизированного комплекса ECOMAG, что позволяет пользователю непосредственно приступить к гидрологическому моделированию. Таким образом, проведенные модификации существенно облегчают начинающему пользователю трудоемкий этап сбора и подготовки необходимой для расчетов информации, тем самым привлекая в ряды начинающих гидрологов студентов и молодых прикладных специалистов.

При этом, нам пришлось пойти на некоторые ограничения в возможностях манипуляции арсеналом команд при навигации по выбору возможных процедур управления информационными ресурсами. Чтобы на начальной стадии освоения настольной версии модельного комплекса исключить вероятность грубых ошибок и некорректных действий со стороны пользователя, приводящих к нестабильной работе системы (несанкционированное нажатие клавиш в оболочке программного комплекса иногда может приводить к «зависанию» системы), некоторые функции геоинформационной подсистемы и виды информационных баз данных и их потоков жестко закреплены. Конечно же, в более полной версии все эти возможности дополнительных манипуляций открыты, и пользователь может выбрать тот или иной вид, например, почвенных или ландшафтных баз данных, специализированных мониторинговых гидрометеорологических ресурсов, степень детализации выделения модельной речной сети и т.д.

В качестве испытаний модернизированный комплекс ECOMAG был адаптирован для построения гидрологических моделей для трех речных крупных водосборов, расположенных в различных физико-географических условиях на ЕТР. Это водосборы Иваньковского водохранилища и р. Белой на Волге, водосбор Цимлянского водохранилища на Дону. Показано, что даже без калибровки параметров удалось получить приемлимые и непротиворечивые результаты моделирования гидрографов стока.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2025-0003).

Список литературы:

Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Бородин О.О., Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Гончуков Л.В., Калугин А.С., Морейдо В.М., Соколов О.В. Национальная гидрологическая моделирующая система: структура, результаты испытаний, приложения // Метеорология и гидрология. 2025. № 9. С. 45–57. DOI: 10.52002/0130-2906-2025-9-45-57;

Калугин А.С. Сток рек европейской части России при глобальном потеплении на 1.5 и 2 градуса // Водные ресурсы, 2023. Т. 50. № 4. С. 451–464.

Крыленко, И.Н., Лебедева, С.В., Панченко, Е.Д., and Алабян, А.М. Моделирование гидродинамических процессов в устьях рек севера Европейской территории России при возможных изменениях климата // Водные ресурсы, 2025. Т. 52, № 1. С. 52–66.

Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд. Российской академии наук, 2018. 300 с. DOI: 10.31857/S9785907036222000001.

Anselmo A. MapWindow Plug-in Development Sample Project: Simple Path Analyzer Plug-in // Free and Open source. Software for Geoinformatics (FOSS4G), Switzerland, 2006. 17 p.

Bugaets A.N., Gonchukov L.V., Motovilov Yu.G., Lupakov S.Yu., Bergen A.A., and Pshenichnikova N.F. Method of Topographic Downscaling of Soil Moisture Fields Derived from Semi-Distributed

Hydrological Models // Water Resources. 2025. Vol. 52. No. 4. pp. 642–649. DOI: 10.1134/S0097807824605570.

Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland K., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // Agricultural and Forest Meteorology. 1999. Vol. 98–99. Pp. 257–277.

Pavlyukevich E.D., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Rets E.P., Korneva I.A., Postnikova N., Rybak O.O. How Do Climate Change and Deglaciation Affect Runoff Formation Mechanisms in the High-Mountain River Basin of the North Caucasus? // Glaciers. 2025. Vol. 2(3). 23 p. DOI: 10.3390/glaciers2030010.

УДК 004.9

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДАТ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Сулейманов М.А.¹, Самохин А.А.², Гайдукова Е.В.¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, www.wasja.ru@bk.ru

²ООО «Эко-Экспресс-Сервис», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения методов машинного обучения для прогнозирования дат начала и конца ледовых явлений. Исследование выполнено на основе многолетних гидрометеорологических наблюдений. Предложен подход к формированию прогностической модели дат ледостава и вскрытия. Результаты показали возможность прогнозирования со средней ошибкой порядка 3–5 суток.

Ключевые слова: машинное обучение, прогнозирование, даты ледовых явлений

В настоящее время прогнозирование сроков ледовых явлений на реках остается актуальной задачей гидрологических исследований, особенно в условиях изменчивости климатических изменений. Целью настоящей работы является разработка и апробация метода прогнозирования дат наступления и вскрытия ледостава на основе методов машинного обучения.

Исходными данными послужили многолетние наблюдения по 6 метеорологическим станциям и 10 гидрологическим постам, равномерно расположенным в верхней, средней и нижней частях бассейна реки Лены. Период наблюдений составляет 1978–1990 гг. В качестве прогнозируемых характеристик рассматривались даты наступления и вскрытия ледостава.

Предикторами служили среднесуточные значения температуры воздуха, температуры воды и уровней воды. Была выполнена проверка этих рядов на однородность и стационарность.

Задача прогнозирования дат ледовых явлений формализована как задача бинарной классификации. В задаче бинарной классификации была введена категориальная переменная, которая является фазовой переменной. Категориальная переменная «Есть лед» представляет собой два значения: 1 – присутствие ледовых явлений, 0 – соответственно, их отсутствие. На вход модели подавались две подвыборки:

- значение предикторов с первого января по середину июня;
- значение предикторов с середины июня по середину ноября.

При подаче первой подвыборки на вход модели определялась дата конца ледовых явлений. Аналогично, по второй подвыборке определялась дата начала ледовых явлений. Модель обучалась 4 раза: за теплый период (1978–1979 гг.), за холодный период (1987–1988 гг.), за средний по температурным условиям период (1982–1983 гг.) и за весь промежуток (6 лет для обучения модели).

В качестве модели был реализован ансамбль из двух моделей – логистической регрессии и «случайного леса». Применение моделей машинного обучения обусловлено отсутствием детерминированных моделей прогнозирования дат ледовых явлений. Для моделей были заданы веса 0.7 для случайного леса и 0.3 для логистической регрессии. Таким образом, был реализован ансамбль моделей, в котором прогнозы, сделанные двумя разными моделями, объединяются для получения окончательного прогноза. «Случайный лес» учитывает нелинейные зависимости между датами ледовых явлений и совокупностью предикторов, а логистическая регрессия – линейные связи.

Логистическая регрессия – это мощный статистический метод, используемый в области машинного обучения для моделирования зависимостей между независимыми переменными и бинарной зависимой переменной. Этот метод широко применяется в различных областях, включая медицину, финансы, маркетинг и многое другое. Модель логистической регрессии

предполагает, что логарифм шансов отнесения к одному из классов является линейной комбинацией независимых переменных. Для обучения параметров модели логистической регрессии используются различные методы оптимизации, такие как метод максимального правдоподобия или метод градиентного спуска. Цель состоит в том, чтобы минимизировать ошибку между предсказанными и фактическими значениями. В процессе обучения алгоритм настраивает коэффициенты модели таким образом, чтобы достичь наилучшего соответствия между моделью и данными.

Случайный лес (*Random Forest*) – это мощный ансамблевый метод машинного обучения, который используется для решения задач классификации и регрессии. Он основан на идее комбинирования прогнозов нескольких решающих деревьев для улучшения качества предсказаний. Случайный лес состоит из коллекции решающих деревьев, каждое из которых обучается независимо друг от друга. Каждое дерево строится на основе подвыборки данных (с возвращением) и подмножества признаков. В результате каждое дерево в лесу получается различным (рис. 1).

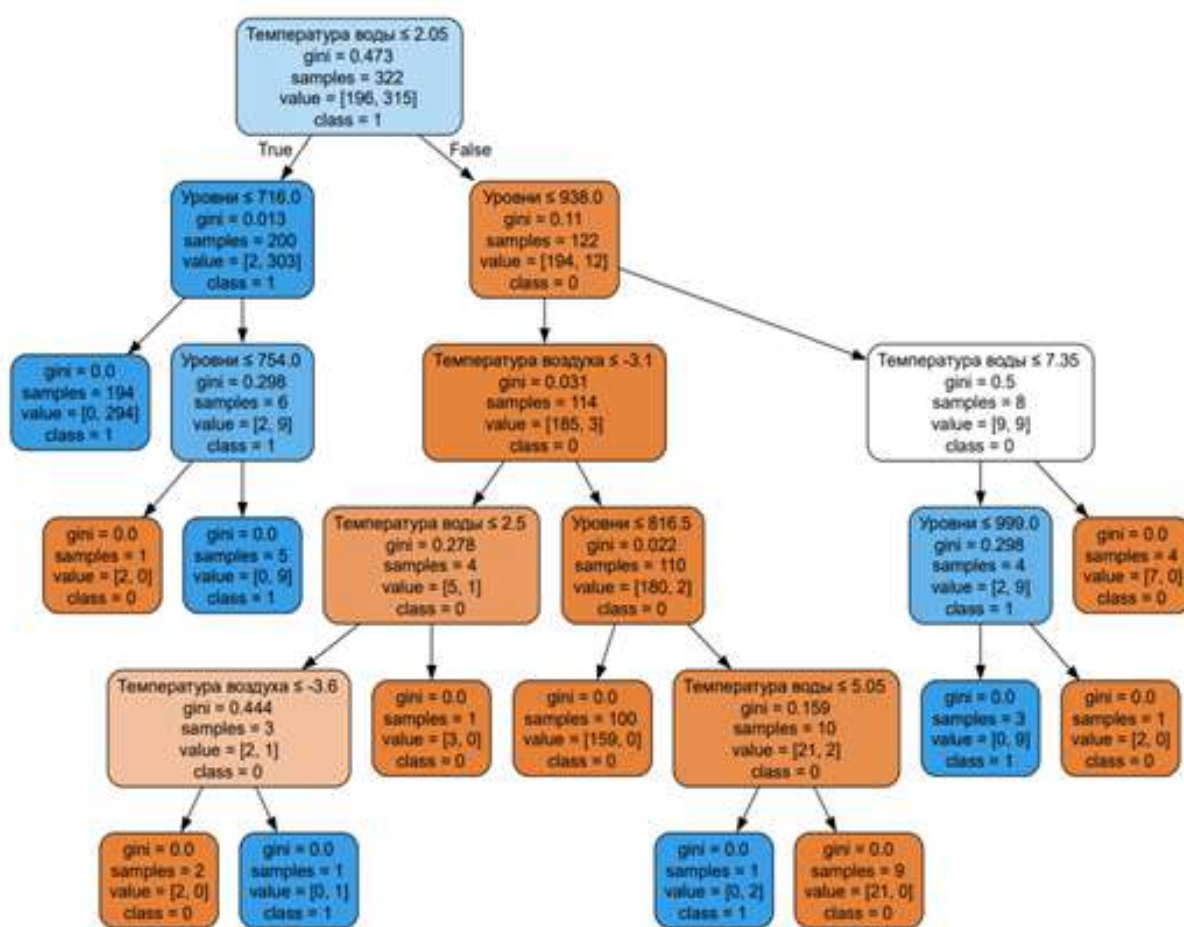


Рис. 1. Визуализация алгоритма модели случайного леса на примере поста Пеледуй – река Лена

Выбор подвыборки: для построения каждого дерева в случайном лесу случайным образом выбирается подмножество данных с возвращением (*bootstrap sample*). Это позволяет обеспечить разнообразие в обучающих данных для каждого дерева. Выбор признаков: при построении каждого дерева случайным образом выбирается подмножество признаков. Это делает случайный лес еще более разнообразным и устойчивым к переобучению. Построение деревьев: для каждой подвыборки данных и подмножества признаков строится решающее

дерево с использованием метода, такого как *CART* (*Classification and Regression Trees*). Деревья строятся до тех пор, пока не будет достигнут критерий останова, например, максимальная глубина дерева или минимальное количество образцов в листе. Объединение предсказаний: после построения всех деревьев в лесу их прогнозы объединяются для получения окончательного предсказания. Для задач классификации это может быть решение голосования, а для задач регрессии – усреднение предсказанных значений.

Описанный подход был реализован в виде программного продукта, обеспечивающего автоматизированную обработку исходных гидрометеорологических данных и получение прогноза дат ледовых явлений. Программная реализация разработанного подхода обеспечивает воспроизводимость расчетов и возможность его применения для других гидрологических постов при наличии исходных данных.

Для исследования были выбраны три характерных периода: холодный период 1978–1979 годов, средний по температуре воздуха период 1982–1983 годов и теплый период 1987–1988 годов. Каждый период длится два года, что позволяет учесть особенности климатических колебаний. Кроме того, была проанализирована совокупная шестилетняя выборка, объединяющая все указанные интервалы. Задача заключалась в разработке эффективной модели прогнозирования ледовых явлений, которая была апробирована для десяти створов на трех годах: 1980, 1989 и 1990.

Выбор характерных периодов осуществлялся на основе амплитудных колебаний среднесуточной температуры воздуха, проиллюстрированных на рис. 2. Средний температурный период был определен по ряду среднесуточных температур и идентифицирован 1980-м годом.

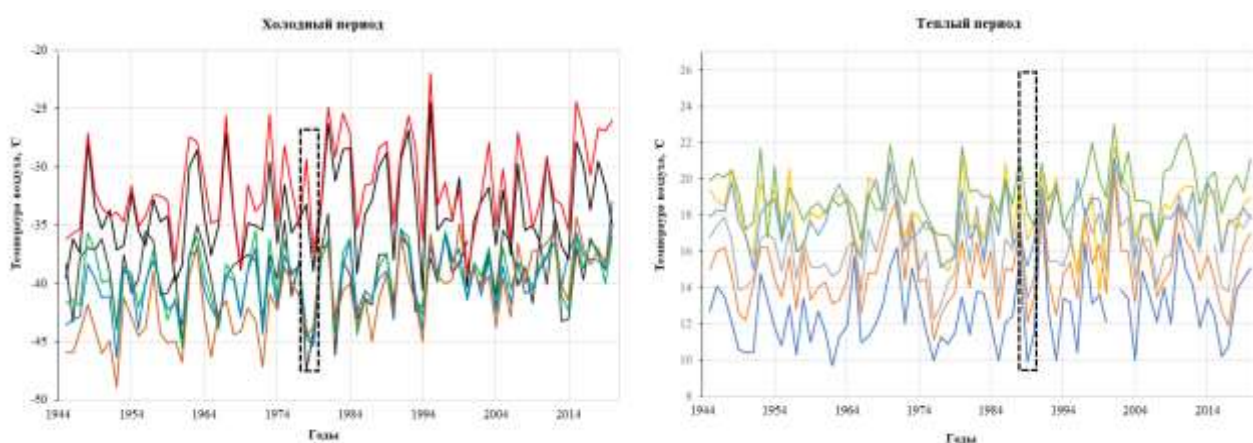


Рис. 2. Определение периодов по температуре воздуха для разных МС

Для начала нужно было определить, как оценивать точность модели. Так как задача классификации, то нельзя использовать стандартные оценки погрешности прогнозов. Поэтому, в качестве оценки точности модели было решено взять разницу между прогнозным и фактическим значениями.

Результаты прогнозирования дат начала ледовых явлений на отдельных гидрологических постах реки Лены для теплого периода представлены в табл. 1.

Таблица 1. Пример результатов прогнозирования дат начала ледовых явлений за теплый период для некоторых гидрологических постов

Река – пост	Начало ледовых явлений по теплому году (1987–88)								
	1980			1989			1990		
	Прогн. знач.	Факт. знач.	Δ , сут.	Прогн. знач.	Факт. знач.	Δ , сут.	Прогн. знач.	Факт. знач.	Δ , сут.
Лена–Пеледуй	16.10.1980	16.10.1980	0	19.10.1989	15.10.1989	4	28.10.1990	25.10.1990	3
Лена–Ленск	15.10.1980	15.10.1980	0	11.10.1989	14.10.1989	–3	21.10.1990	24.10.1990	–3
Лена–Мача	15.10.1980	16.10.1980	–1	11.10.1989	15.10.1989	–4	22.10.1990	24.10.1990	–2
Лена–Олекминск	15.10.1980	17.10.1980	–2	11.10.1989	15.10.1989	–4	21.10.1990	24.10.1990	–3
Лена–Джарджан	04.10.1980	26.09.1980	8	08.10.1989	26.09.1989	12	17.10.1990	25.09.1990	22

Анализ полученных результатов показывает, что в большинстве случаев фактическое начало ледовых явлений происходит позже прогнозируемого. Подобные расхождения могут быть обусловлены влиянием совокупности гидрометеорологических факторов, включая температурный режим воздуха и воды, а также особенности гидрологического режима реки. Максимальные отклонения между прогнозируемыми и фактическими значениями достигают 20–22 суток и наблюдаются в отдельные годы с аномальными температурными условиями. В то же время для ряда постов разница между прогнозом и наблюдениями не превышает 1–2 суток, что свидетельствует о высокой точности прогноза в условиях, близких к средним многолетним.

В целом полученные результаты подтверждают возможность применения предложенного подхода для прогнозирования дат начала ледовых явлений на реках, при этом наибольшая точность достигается в годы со стабильными температурными условиями.

Аналогичным образом выполнено прогнозирование дат окончания ледовых явлений на реке Лене. Полученные результаты показали сопоставимую точность прогноза по сравнению с датами начала ледовых явлений, при этом наибольшие отклонения также отмечаются в годы с выраженными аномалиями температурного режима. Это подтверждает универсальность предложенного подхода для прогнозирования различных фаз ледового режима.

В работе рассмотрена возможность прогнозирования дат начала и окончания ледовых явлений на реках на основе методов машинного обучения. Предложенный подход апробирован на данных гидрологических постов бассейна реки Лены и показал удовлетворительную точность прогноза. Установлено, что наибольшие отклонения прогнозируемых дат наблюдаются в годы с аномальными температурными условиями. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов машинного обучения для решения задач прогнозирования ледового режима при отсутствии детерминированных моделей.

Список литературы:

Гидрологический ежегодник 1955 г том 8 Бассейны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского выпуск 0–7. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1960.

Рашка Себастьян, Мирджалили Вахид Python и машинное обучение. [Текст] / Рашка Себастьян, Мирджалили Вахид: Диалектика, 2021 год.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Инди́гирский район. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 651 с.

Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб: изд. РГГМУ, 2007. 279 с.

УДК 556.16

ОБ ОЦЕНКАХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ АДМИНИСТРАТИВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Грек Е.Н., Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Кузнецова О.М., Ефимова М.А.

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия,

grekelena.ggi@gmail.com

Аннотация. Ежегодно возобновляемые водные ресурсы территорий являются важнейшим природным активом нашей страны, в значительной мере определяющим условия водообеспечения населения и экономики, перспективы развития водоемких отраслей промышленности и сельского хозяйства. Методы оценки водных ресурсов административных территорий были разработаны в ФГБУ «ГГИ» в 1960-х – 1970-х годах и основой этих методов являются данные о годовом стоке рек в пунктах гидрологических наблюдений и система линейных уравнений для пересчета годового стока в створах гидрологических постов к створам, расположенным на границе административной территории. В последующие десятилетия произошло изменение количества гидрологических постов на реках с наблюдениями за стоком, особенно значительное их сокращение в 1990-х годах, что требует корректировки разработанных методов. Работа посвящена актуализации методов оценки водных ресурсов для субъектов Дальневосточного федерального округа (ДФО) с учетом современной структуры гидрологических постов на реках ДФО и сопредельных регионов.

Ключевые слова: водные ресурсы, речной сток, гидрологическая сеть, Дальневосточный федеральный округ

При оценке водных ресурсов любых территорий определяется годовой приток речных вод из сопредельных регионов, отток воды за пределы данной территории и местный сток, сформированный в ее пределах. Общие водные ресурсы территории рассчитываются как сумма притока и местного стока. Если субъект имеет границы с зарубежными странами, то дополнительно определяется величина стока, поступающего из-за границы и уходящего за пределы страны.

Объем притока, поступающего по рекам на рассматриваемую территорию из соседних областей, определяется по данным наблюдений на ближайших к ее границам гидрологических постах. Аналогичным образом определяется отток рек за пределы территории. Поскольку гидрологические посты обычно расположены на удалении от границы субъекта, определяются коэффициенты для пересчета стока от створа наблюдений к границе по соотношению площадей водосборов или с учетом распределения стока по длине реки.

Основные проблемы при определении притока (оттока) возникают при расчетах для территорий, неизученных в гидрометрическом отношении. В этих случаях их значения рассчитываются с помощью метода гидрологической аналогии с использованием данных по рекам – аналогам, на которых ведутся наблюдения за стоком.

Местный сток, сформированный в пределах рассматриваемой территории, рассчитывается с учетом ее физико-географических особенностей и гидрологической изученности следующими способами: по разности величин суммарного оттока и притока или суммированием годового стока рек, протекающих в пределах территории.

Впервые данная методика была реализована для оценки средних многолетних водных ресурсов административных территорий СССР (Водные..., 1967). Дальнейшее ее развитие было связано с решением задачи ежегодной оценки водных ресурсов территорий. Для этой цели была разработана система линейных уравнений, с помощью которых по данным о годовом стоке рек на гидрологических постах были рассчитаны характеристики водных ресурсов союзных республик и экономических районов СССР (Бабкин, Воскресенский, 1975).

Начиная с 1981 г. по этой методике в ФГБУ «ГГИ» ежегодно рассчитываются водные ресурсы административных территорий страны и публикуются в изданиях водного кадастра РФ «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество» (Водный...,

1981–2024). Обобщенные сведения о водных ресурсах всех единиц территориального деления страны от областей и выше приведены в ряде монографий (Государственный..., 1987), (Водные..., 2008).

В процессе разработки и практической реализации методики оценки водных ресурсов административных территорий возникали и возникают следующие проблемы:

- неоднократно происходили изменения административно-территориального деления СССР, а позднее Российской Федерации, что требовало пересмотра имеющихся, а также разработки новых расчетных схем оценки водных ресурсов;
- изменение количества гидрологических постов на реках с наблюдениями за стоком, в том числе значительное их сокращение с конца 1980-х и в 1990-х гг., требовало систематической корректировки методики.

С учетом вышеизложенного, актуализация методов оценки водных ресурсов на примере 11 субъектов ДФО производилась с учетом:

- современной структуры гидрологических постов на реках ДФО и сопредельных регионов, а также данных о годовом стоке рек за 2020–2023 гг.,
- использования ГИС-технологий для визуализации рассматриваемых территорий с расположением действующих и ранее закрытых гидрологических постов, выделения и определения площадей водосборов, неохваченных гидрометрическими наблюдениями.

В качестве гидрологической информации использовались данные о годовом стоке 119 гидрологических постов, расположенные как на территории ДФО, так и на территории соседних субъектов. Из них 5 являются уречными и 24 – закрытыми. Дополнительно используются данные о годовом стоке 21 гидрологического поста в качестве рек-аналогов (рис. 1).



Рис. 1. Расположение гидрологических постов

1 – Республика Саха (Якутия); 2 – Забайкальский край; 3 – Амурская область; 4 – Еврейская автономная область; 5 – Хабаровский край; 6 – Приморский край; 7 – Республика Бурятия; 8 – Чукотский автономный округ; 9 – Магаданская область; 10 – Камчатский край; 11 – Сахалинская область

Для каждого из 11 субъектов и для всего Дальневосточного федерального округа были рассчитаны характеристики водных ресурсов за 2020–2023 гг.: приток, отток, местный сток и общие водные ресурсы. Также рассчитывались приток из-за границы и отток за границу, если такие имелись. Далее полученные значения сравнивались с опубликованными в изданиях водного кадастра (Водный..., 1981–2024).

В среднем, за 2020–2023 гг. различие в оценках общих водных ресурсов округа составляет 0.3%, местных водных ресурсов 1.1%, общего притока с других территорий 4.3%. Наиболее значительные различия, превышающие в отдельные годы 20%, выявлено в оценках притока, поступающего из-за границы.

В результате выполненных работ актуализированы методы оценки водных ресурсов 11 субъектов Дальневосточного ФО в том числе местного стока, сформированного в пределах рассматриваемой территории, притока из сопредельных территорий и оттока из субъектов. Годовые водные ресурсы субъектов определены как разница оттока и притока. Использование ГИС-технологий позволило объективно определить площади водосборов, участвующих в формировании водных ресурсов административных единиц, в том числе освещенных и неосвещенных гидрометрическими наблюдениями, обосновать выбор рек-аналогов для расчета водных ресурсов рек и территории при отсутствии данных наблюдений за стоком.

Получены линейные уравнения для расчета стока с неизученных территорий и в створах границы субъектов на основе информации по годовому стоку на действующих в настоящее время гидрологических постах. Сравнение результатов расчетов характеристик водных ресурсов 11 субъектов ДФО за 2020–2023 гг. с опубликованными в (Водный..., 1981–2024) показало, в целом, их достаточно хорошее соответствие, что свидетельствует о надежности разработанной ранее методологии их оценки. Вместе с тем требуется корректировка отдельных методик расчета стока отдельных субъектов с учетом полученных результатов.

Исследования выполнены в рамках НИТР – 1.5 Росгидромета «Развитие методов оценки ресурсов поверхностных вод Российской Федерации, расчетов гидрологических характеристик и моделирования гидрологических процессов» и будут продолжены для других территорий страны.

Список литературы:

Бабкин В. И., Воскресенский К. П. и др. Методические основы расчета водных ресурсов и водного баланса территории СССР. Труды ГГИ. 1975. Вып. 241. С. 11–28.

Водные ресурсы и водный баланс территории СССР. Гидрометеиздат, 1967. 199 с.

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. проф. И. А. Шикломанова. СПб: Государственный гидрологический институт. 600 с.

Водный кадастр Российской Федерации. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 1981–2024 гг.

Государственный водный кадастр: Водные ресурсы СССР и их использование / Под ред. В. С. Вуглинского. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 302 с.

УДК 556.16.048

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СТОКА РЕКИ БИТЮГ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА

Дубачева А.В.¹, Дмитриева В.А.¹, Кочетова Ж.Ю.^{1,2}

¹Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия, arsvdub@gmail.com

²Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Россия.

Аннотация. Для понимания и прогнозирования динамики речного стока использован подход к реконструкции фазового пространства. Временной ряд расходов воды р. Битюг, измеренных на гидрологическом посту Бобров в Воронежской области реконструировали в фазовых пространствах. Результаты говорят о присутствии в системе детерминированного хаоса, при этом с каждым годом стохастические процессы нарастают и в ближайшее время прогноз гидрологических характеристик р. Битюг станет невозможным.

Ключевые слова: речной сток, прогнозирование, хаотическая динамика, реконструкция фазового пространства, река Битюг.

Понимание динамики речного стока важно для моделирования состояния систем, связанных с использованием водных ресурсов, а также для прогнозирования опасных гидрологических процессов (Виноградов, Виноградова, 2010). Выбор метода зависит от цели моделирования, доступности данных, ресурсов и сложности бассейна. Традиционно процесс формирования речного стока, закономерности его многолетних колебаний и сезонного хода рассматривали как результат действия совокупности факторов, что определяло стохастический подход к изучению этих закономерностей (Болгов, 2021).

Результаты исследований последних десятилетий, основанных на методах нелинейной динамики, доказывают наличие детерминированного хаоса в многолетних рядах стока (Коваленко, 2017). Так, с применением теории хаоса О.А. Юшкиной изучены временные ряды расходов воды рек Обского бассейна и р. Днепр. Результаты исследования позволили сделать вывод, что многие временные ряды стока с интервалом дискретности, равным месяцу и декаде, нелинейны и содержат признаки детерминированного хаоса. Это определяет целесообразность применения методов нелинейной динамики для расчетов стока и его прогнозов с заблаговременностью, равной интервалу дискретности ряда наблюдений (Юшкина, 2009).

Цель работы: исследовать нелинейные динамические свойства многолетней изменчивости стока р. Битюг – г. Бобров с сезонным ходом водности и определить возможность их использования в прогнозах стока.

Объектом исследования является временной ряд среднемесячных расходов воды (Q , м³/с) р. Битюг – г. Бобров за 1951–2021 гг. Река Битюг протекает в Воронежской, Тамбовской и Липецкой областях. Она является левым притоком р. Дон. Длина реки составляет 379 км, площадь бассейна – 8840 км². Битюг течет по равнинной местности с небольшими холмами и лесостепными ландшафтами Окско-Донской низменности, преимущественно в южном направлении.

Анализ гидрологического режима рек Донского бассейна показал: современный период характеризуется высоким динамизмом поверхностных речных вод, что проявляется снижением максимальных и увеличением минимальных расходов воды в реках, растянутостью половодья, зимними оттепелями и паводками, выравниванием стока по сезонам, сокращением продолжительности ледостава (Дмитриева, 2018, 2023).

Рассчитанный методом постоянной средней индекс сезонности ($I_{сез}$, %) подтверждает, что влияние сезонности на расходы воды постепенно нивелируется (рис. 1). Это вызвано изменениями климата и антропогенной деятельностью. Поэтому в этой работе для обучающей

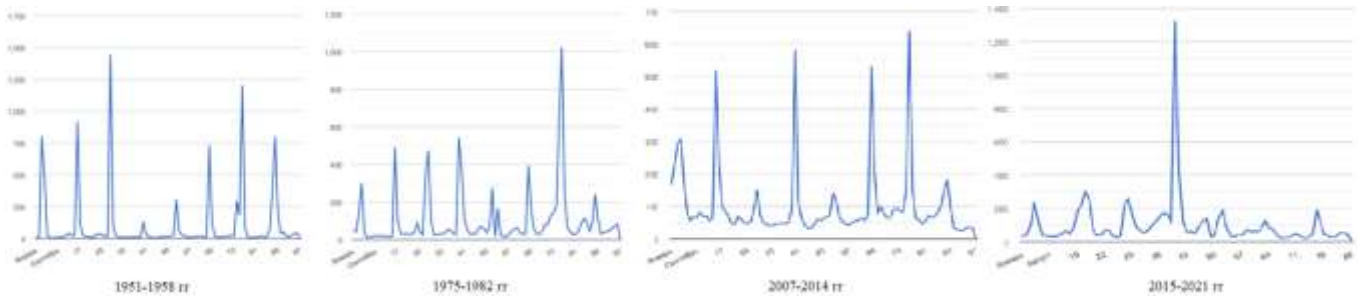


Рис. 1. Индекс сезонности расходов воды р. Битюг– г. Бобров в различные периоды наблюдений

выборки использовали данные измерения расходов воды с 1989 г. по 2019 г. на гидрологическом посту Бобров.

Для исследования хаоса в динамике среднемесячных расходов воды и составления краткосрочных прогнозов применяли метод нелинейного прогнозирования. Для скалярного временного ряда расходов воды X_i (где $i=1, 2, \dots, N$) фазовое пространство может быть восстановлено в виде (Мальцева и др., 2014):

$$Y_j = (X_j, X_{j+\tau}, X_{j+2\tau}, \dots, X_{j+(m-1)\tau}), \quad (1)$$

где $j=1, 2, \dots, N-(m-1)\tau$, m – размерность вектора Y_j , называемая размерностью вложения (минимальное число динамических переменных, однозначно описывающих наблюдаемый процесс); τ – время задержки.

Корректная реконструкция фазового пространства в измерении m позволяет интерпретировать лежащую в его основе динамику в виде m -мерной карты f_T :

$$Y_{j+T} = f_T(Y_j), \quad (2)$$

где Y_j и Y_{j+T} – векторы размерности m , описывающие состояние системы в моменты времени j (текущее состояние) и $j+T$ (будущее состояние).

По методу локальной аппроксимации область f_T разделяется на множество локальных областей, каждая из которых определяет приближения F_T , действительные только в этом подмножестве (Лоскутов и др., 2003):

$$\sum_{p=1}^k \|Y_{j+1}^p - F_T Y_j^p\|^2. \quad (3)$$

Учитывается начальная точка Y_j , с которой начинается прогноз, определяются соседи Y_j^p ($p=1, 2, \dots, k, j^p < j$), ближайшие к Y_j , которые составляют множество, соответствующее Y_j . С помощью этого алгоритма можно построить локальные функции, которые переводят каждую точку окрестности в следующую окрестность: от Y_j^p до Y_{j+1}^p . Локальная карта F_T определяется методом наименьших квадратов, минимизирующих выражение (3). Прогнозы делаются на локальной карте из новой точки Z_0 , для которой будет найден ближайший сосед в обучающем наборе Y_q . Затем находится эволюция Z_0 , которая обозначается как Z_1 и задается формулой:

$$Z_1 = F_q(Z_0). \quad (4)$$

Следующим находится ближайший сосед к Z_1 , и процедура повторяется для прогнозирования последующих значений. Описанная выше методика используется в данном

исследовании для локальных полиномиальных прогнозов, реализованных в программном обеспечении GeneXproTools 2023.

Оценка точности прогноза в этом исследовании произведена с помощью коэффициента детерминации (R^2). Наличие хаоса можно обнаружить, проверив точность прогноза на соответствие размерности вложения и времени задержки. Если динамика хаотична, то точность прогнозирования будет увеличиваться с увеличением размерности пространства вложения до оптимальной (m_{opt}), и останется высокой для размерностей вложения, превышающих m_{opt} . Для стохастических временных рядов точность прогнозирования остается неизменной при любом значении этого параметра. При росте времени задержки и фиксированной размерности пространства вложения прогнозы в хаотических системах изменяются быстрее, чем в стохастических. Это связано с чувствительностью хаотических систем к начальным условиям (Базарский, Кочетова, 2021).

Для обучающей выборки использовали 372 значения среднемесячных расходов воды за период с 1989 по 2019 годы. Прогнозировали Q для 2020 и 2021 гг. Фазовое пространство реконструировали с размерностями пространства вложения от 1 до 10. На рисунке 2 показана реконструкция ряда Q в двумерном фазовом пространстве при $\tau=1, 3, 6$, и 12 месяцев. Четко видимый аттрактор присутствует при $\tau=3$, что объясняется сезонной неравномерностью стока. Затем аттрактор становится менее понятным и при увеличении τ до 12 месяцев исчезает.

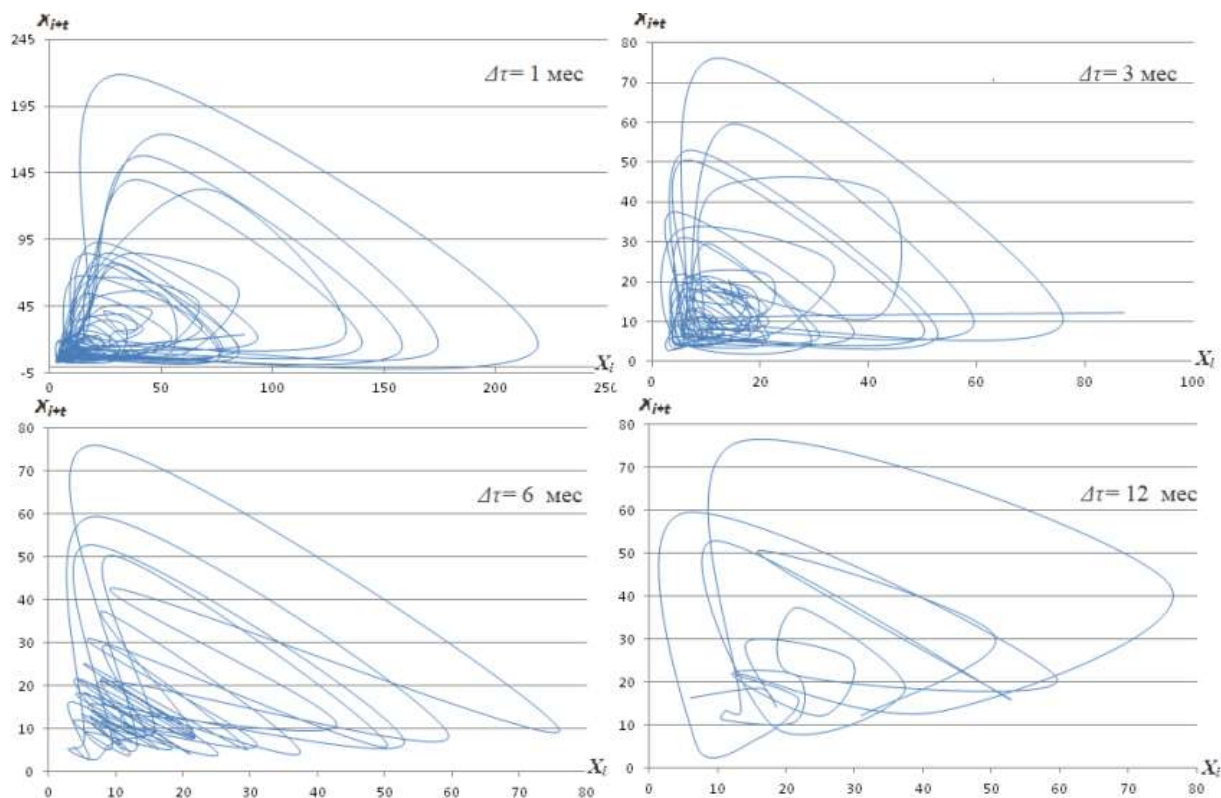


Рис. 2. Фазовая пространственная диаграмма среднемесячных расходов воды р. Битюг– г. Бобров с $\tau = 1, 3, 6, 12$ месяцев (1989–2019 гг.)

На рис. 3 с использованием графиков временных рядов сравниваются прогнозируемые значения расходов стока с различными временем задержки и размерностью вложения.

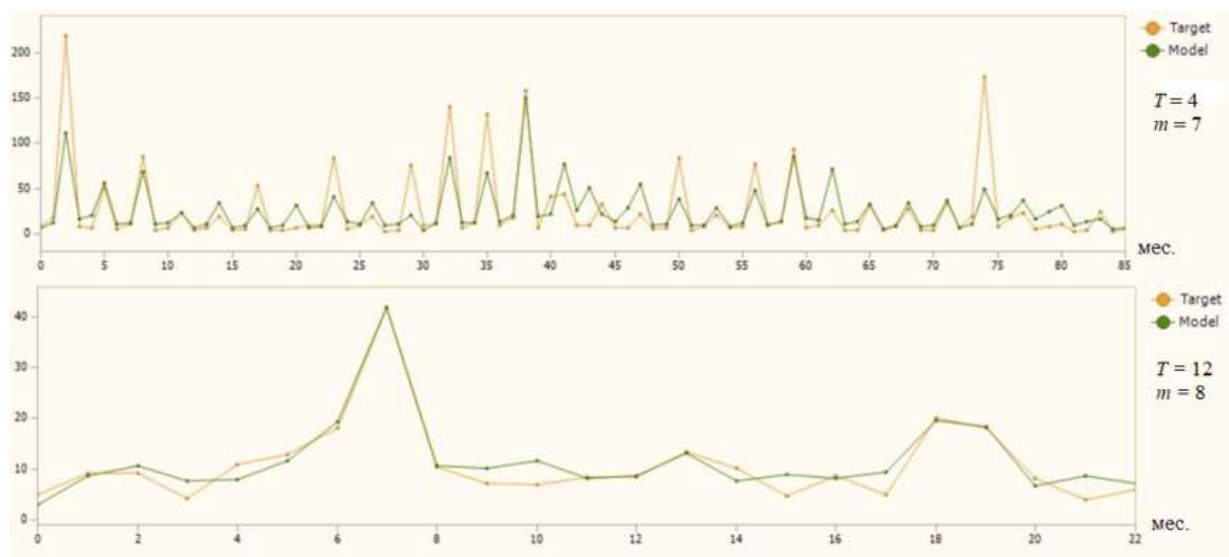


Рис. 3. Сравнение наблюдаемого и прогнозируемого расходов воды р. Битюг– г. Бобров с использованием временных рядов с различными размерностями вложения m и временем задержки T (1989–2019 гг.)

В табл. 1 подробнее представлены коэффициенты детерминации R^2 для прогнозируемой и реальной выборок при размерностях вложения $m=1-10$ и временем T от 1 до 12 мес.

Таблица 1. Характеристики точности моделирования расходов воды р. Битюг– г. Бобров.

T	m									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.1152	0.0357	0.0706	0.0926	0.0841	0.1025	0.1107	0.1183	0.1557	0.1083
2	0.0197	0.0573	0.0692	0.1086	0.1436	0.5498	0.5590	0.5486	0.5694	0.5942
3	0.1102	0.1561	0.1549	0.4341	0.3725	0.3749	0.3700	0.3219	0.4305	0.4662
4	0.3446	0.5725	0.5955	0.6050	0.4774	0.6372	0.7443	0.6733	0.5552	0.4089
6	0.2174	0.2346	0.3805	0.2562	0.4382	0.4311	0.4202	0.4242	0.4196	0.2746
12	0.2487	0.2653	0.5981	0.4315	0.3940	0.4154	0.4121	0.8617	0.8614	0.8412

Аналогичные расчеты были проведены для временного промежутка с 1951 по 1989 гг., при этом было установлено, что минимальное количество переменных, описывающих сток, $m_{\text{opt}}=3-5$ для $T=1-12$. Как следует из таблицы 1, для всех других значений T получены низкие значения R^2 , изменяющиеся независимо от размерности вложения, что свидетельствует о стохастичности современной гидрологической системы. Можно предположить, что при дальнейшем сглаживании сезонности прогноз стока реки будет невозможен.

Список литературы:

- Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю. Энтропия абиотических геосфер и модель для оценки и прогноза их состояния // Биосфера. 2021. Т. 13. № 1-2. С. 9–14.
- Болгов М.В. Стохастическая гидрология: развитие основных идей в России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. № 66 (1). С. 19–40.
- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 298 с.

Дмитриева В.А. Гидрологический режим рек Донского бассейна // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 77–84.

Дмитриева В.А. Гидрологическая роль промерзания почвы в формировании стока весеннего снегового половодья в бассейне Верхнего Дона // Вопросы степеведения. 2023. № 1. С. 16–24.

Коваленко В.В. Речной сток: визуализация многомерных вероятностных распределений: учебное пособие. СПб: РГГМУ, 2017. 50 с.

Лоскутов А.Ю., Журавлев Д.И., Котляров О.Л. Применение метода локальной аппроксимации для прогноза экономических показателей // Вопросы анализа и управления риском. 2003. Т. 1. № 1. С. 21–31.

Мальцева Г.Н., Назарова А.В., Якимов В.Л. Алгоритм реконструкции фазового пространства динамической системы и его применение для разработки прогнозных моделей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 33-39.

Ресурсы поверхностных вод. Гидрологическая изученность. Т. 7. Донской район. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 267 с.

Юшкина О.А. Анализ и прогноз временной изменчивости речного стока методами нелинейной динамики: автореф. дис. ... канд. геогр. наук, Иркутск, 2009.

УДК 556.5

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА ECOMAG К ПЛОТНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ЕТР

Загребаев В.Ю.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, vladislavzagrebaev@yandex.ru

Аннотация. На примере речного бассейна реки Белой, расположенной на территории Башкортостана, выполнен анализ чувствительности физико-математической пространственно-распределенной гидрологической модели ECOMAG к плотности используемой метеорологической сети.

Ключевые слова: речной сток, моделирование, ECOMAG, плотность метеорологической сети

Современные методы анализа данных находят широкое применение в различных областях науки и техники. Целью настоящей работы является оценка чувствительности модели формирования речного стока к плотности метеорологической сети.

Корректные метеорологические данные являются неотъемлемой составляющей при проведении моделирования гидрологических процессов на речных объектах с целью получения достоверных данных для дальнейшего анализа, поскольку они выступают в роли граничных условий, определяющих динамику формирования речного стока. Учет и репрезентативность климатических данных в условиях пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических процессов становится критическим фактором, напрямую влияющим на верификацию используемых моделей и минимизацию неопределенностей расчетных характеристик. Считается, что информативность баз метеорологических данных превосходит надежность данных измерений на гидрологических постах, поэтому их применение в гидрологических моделях в большинстве случаев ограничено, так как некачественные данные об осадках могут спровоцировать ухудшение результатов моделирования и, соответственно, к затруднению верификации модели (Мотовилов и др., 2017).

В данной работе для описания процессов формирования речного стока используется пространственно-распределенная физико-математическая модель ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics). Конструктивные особенности данной модели в виде разделения поверхности речного бассейна нерегулярной сеткой на элементарные водосборы с учетом особенностей рельефа и структуры речной сети и проведение моделирования для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт В), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока позволяют описать поверхностную и подземную составляющие речного стока воды на водосборах, а также движение воды с учетом влияния климата в конкретно рассматриваемом регионе исследования. (Мотовилов, Гельфан, 2018).

В качестве исследуемого речного бассейнов рассматривается водосборная территория р. Белой (Южный Урал). Площадь бассейна протекающей по всей территории Башкортостана, составляет 142000 км². Питание реки снеговое (Хасанов, 2024).

В качестве информационного обеспечения модели ECOMAG используются данные гидрологического и метеорологического мониторинга территории России. Для проведения модельной речной сети и схематизации водосборной территории рассматриваемого водного объекта применяется цифровая модель рельефа (ЦМР) Европейской территории России на основе SRTM с разрешением 1х1км и цифровые почвенная и ландшафтная карты данной территории. В геоинформационной системе MapWindow, в которой работает модель ECOMAG, отображены сети метеорологических постов различной плотности от масштабов общей базы метеостанций, расположенных на территории РФ, до единичных экземпляров,

относящихся к водосбору. Период 2002-2007 гг. был выбран для калибровки параметров и оценки точности расчетов по модели на основе критерия Нэша-Сатклифа (NS):

$$NS = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2},$$

где $F_0^2 = \sum_i (Q_i - Q_{\text{ср}})^2$, $F^2 = \sum_i (Q_{i,p} - Q_i)^2$, $Q_{i,p}$ - рассчитанный по модели расход воды в i -е сутки, Q_i - фактический расход, $Q_{\text{ср}}$ - средняя величина фактического расхода воды за период расчета. Чем ближе NS к единице, тем выше точность моделирования (Мотовилов и др., 2017).

Для исследования чувствительности модели к плотности метеорологической сети используются четыре массива данных метеостанций:

1. Расширенная база метеостанций Росгидромета, включающая информацию по более чем 2000 пунктам наблюдений, покрывающая всю территорию Российской Федерации (из них на регион ЕТР приходится 626 штук);
2. Доступная в Интернете база данных метеостанций ВНИМГМИ-МЦД на территорию РФ⁴ в количестве 600 штук (на территории ЕТР 164 метеостанции);
3. Усеченная база данных 223-х опорных метеостанций ВНИМГМИ-МЦД на территорию РФ, доступная до 1990-х годов (на ЕТР в количестве 75 штук);
4. База данных единичных метеостанций, расположенных в центрах территориях рассматриваемых водосборов.

Методика оценки чувствительности модели к плотности используемой для расчетов метеорологической сети включала исследования по двум сценариям:

- калибровка параметров модели выполняется по самой большой и плотной расширенной базе данных метеостанций (626 штук на ЕТР), и последующие расчеты выполняются без изменений калибровочных параметров модели на трех других наборах метеостанций меньшей площадной плотности (соответственно, 164, 75 и 1);
- калибровка параметров модели выполняется для каждого набора метеостанций отдельно.

Проведенные численные эксперименты показали, что снижение плотности метеорологической сети и соответствующего объема ежедневных данных по пространственным полям осадков и температуры воздуха над территорией речного бассейна приводит к закономерной потере точности расчетов по пространственно-распределенной гидрологической модели от оценки «хорошая» (NS=0.824 для 626 метеостанций на ЕТР) до «удовлетворительно» (NS=0.538 для одной метеостанции в г. Уфе, расположенной в центре водосбора р. Белой).

Оценки чувствительности модели по второму сценарию показали, что даже при низкой плотности метеорологической сети качество расчетов можно повысить путем калибровки параметров на используемом наборе метеоданных. Возможность гидрологических расчетов по ограниченному метеоданным достаточно ярко проявляется на равнинной территории ЕТР для водосборов с преимущественно снеговым питанием рек во время весеннего половодья. Снежный покров формируется длительной время главным образом за счет фронтальных осадков, пространственная изменчивость которых в отличие от дождевых осадков конвективного происхождения невелика.

Итоговые значения критерия NS по отдельным гидропостам для периода калибровки и валидации модели по первому и второму сценариям приведены в табл. 1 и 2.

⁴ База данных доступна по ссылке: <http://meteo.ru/data/>

Таблица 1. Итоговые значения критерия NS по первому сценарию.

Гидропосты	Расширенная БД (626 шт.)		БД ВНИМГМИ- МЦД (164 шт.)		Усеченная БД ВНИМГМИ- МЦД (75 шт.)		БД единичных метеостанций	
Бирск	0.8178	0.8248	0.6876	0.6783	0.5784	0.5632	0.5835	0.5384
Уфа	0.8126		0.6722		0.5588		0.5403	
Стерлитамак	0.5132		0.3131		0.2345		0.478	

Таблица 2. Итоговые значения критерия NS по второму сценарию.

Гидропосты	Расширенная база (626 шт.)		БД ВНИМГМИ- МЦД (164 шт.)		Усеченная БД ВНИМГМИ- МЦД (75 шт.)		БД единичных метеостанций	
Бирск	0.8178	0.8248	0.6753	0.6656	0.7177	0.716	0.6776	0.6416
Уфа	0.8126		0.6619		0.7076		0.6429	
Стерлитамак	0.5132		0.2998		0.4018		0.1595	

Таким образом, для получения качественных результатов гидрологического моделирования рекомендуется использование наиболее полной метеорологической сети и при необходимости проведение дополнительной локальной калибровки модели.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВП РАН по теме FMWZ-2025-0003.

Список литературы:

Мотовилов Ю.Г., Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Гончуков Л.В., Калугин А.С., Лупаков С.Ю., Морейдо В.М., Сучилина З.А., Фингерт Е.А. Моделирование формирования стока в бассейне р. Уссури на базе модели ECOMAG // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. М., 2013. С. 247–252

Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.

Хасанов И.А., Елизарьев А.И., Тараканов Д.А. Оценка эффективности методов выделения базисного стока для бассейна реки Белой, Россия // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология». Науки о Земле. 2024. С. 85–95

УДК 89.57.25, 37.27.00

МОНИТОРИНГ МОРФОМЕТРИИ ВОДОЕМОВ НА ОСНОВЕ ЦМР ПО ОПТИЧЕСКИМ ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Кутузов А.В.

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
152742 пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия, kutuzov@ibiw.ru

Аннотация. По Рыбинскому и Цимлянскому водохранилищам получены картографически точные данные контуров побережья для разных уровней стояния вод водохранилища. Спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в оптическом диапазоне – основа для создания таких карт. На основе этих материалов и высотных данных из других картографических источников построена картографическая цифровая модель рельефа (ЦМР) побережий в созданном ГИС (QGIS) проекте «Акватерра». С помощью итоговой ЦМР, определены морфометрические параметры прибрежной зоны: площади затопления и объемы аккумулированной воды мелководий для любого допустимого уровня стояния.

Ключевые слова: ДЗЗ, гидрограф, уровенный режим, ГИС, спектр отражения, Landsat, SRTM.

Морфометрические характеристики водохранилищ весьма изменчивы в ходе регулирования естественного речного стока. Выделяются зоны временного затопления, зоны подтопления грунтовыми водами, мелководья. С целью определения положения прибрежных территорий в зависимости от уровенного режима водохранилища создан ГИС проект «Акватерра» для всей прибрежной зоны Рыбинского и Цимлянского водохранилищ.

Водные поверхности обладают высокой поглощающей способностью (низкой спектральной яркостью отражения), особенно в длинноволновой части электромагнитного спектра (1.43 мкм и 1.93 мкм). В то время как для растительного покрова в ближнем инфракрасном диапазоне – максимум спектральной яркости. Отражение воды, почвы и растительности, в данной работе, оценивались на разных длинах волн (разных каналах) сканеров спутников семейства Landsat-5–9 (15–30 м/пиксель пространственное разрешение снимка). Выделение границ водохранилища проводилось при разных уровнях водохранилища, для крупномасштабного картографирования использовали серию спутниковых сцен ДЗЗ (данные спутников Landsat-5–9, Sentinel-2). Анализ спутниковых снимков проводился в оптическом спектре, в ближнем инфракрасном свете NIR, для выявления диапазона значений пикселей, соответствующих яркости водной поверхности (Географические..., 2024). Процедура выбора снимков для выделения контрастных элементов границ «вода-суша» предполагает определение их наибольшего спектрального контраста на анализируемом растровом снимке. При определении границы «вода-суша» удовлетворительные результаты дает анализ спутникового снимка в спектре максимального поглощения воды (например, 5 канал для Landsat) и сравнительно низкого поглощения суши, без использования вегетационных индексов (Кутузов, 2008).

На основе обработки выборки спутниковых снимков (данных ДЗЗ) на периоды контрастных уровней стояния вод водохранилища (для периодов «высокой» и «низкой» воды), в ГИС проводилась последовательная векторизация контуров для переходных ландшафтов «вода-суша». Контуров проводятся, по использованному нами ранее алгоритму определения границы «вода-суша», на основе оценки спектральной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне (Кутузов, 2011). Так создаются полигональные объекты соответствующие территориям затопления. В итоге были созданы векторные слои на основе выбранных данных ДЗЗ (2013–2019, 2022 гг.).

Основа для отбора ДДЗ, по дате их создания – месячная динамика уровня водохранилища на интересующий период: максимум и минимум в теплый период (до

замерзания). Обычно эти экстремумы для Цимлянского и Рыбинского водохранилища приходятся на май и ноябрь месяцы – рис. 1 (данные Росгидромета⁵). Многолетние ежедневные данные уровня режима с 2001 г.

Примеры векторизации контуров, выбранных для обработки снимков, представлены на рисунке (рис. 1). Таким методом для Цимлянского и Рыбинского водохранилищ вычислены морфометрические характеристики побережья и акватории с высокой точностью, при использовании данных ДЗЗ в проекте ГИС «Акватерра». Округленно, для уровней стояния вод: 31, 33, 35, 36 м, отмечены цветом: синим, зеленым, красным, розовым – соответственно; темно-серый – вода. Таким образом, в полуавтоматическом режиме был определен и рельеф прибрежной зоны – как линии уступов для каждого выбранного уровня (рис. 1). Размеры переходных ландшафтов «вода-суша» могут исчисляться километрами для пологих участков побережий (в наших исследованиях до 3.5–5 км) или практически отсутствовать — для крутых, обрывистых берегов. Площади переходных ландшафтов на Рыбинском водохранилище составляют от 3% (максимума заливания) для средних многолетних уровней и до 17% для редких критических уровней последнего 20-летнего периода.

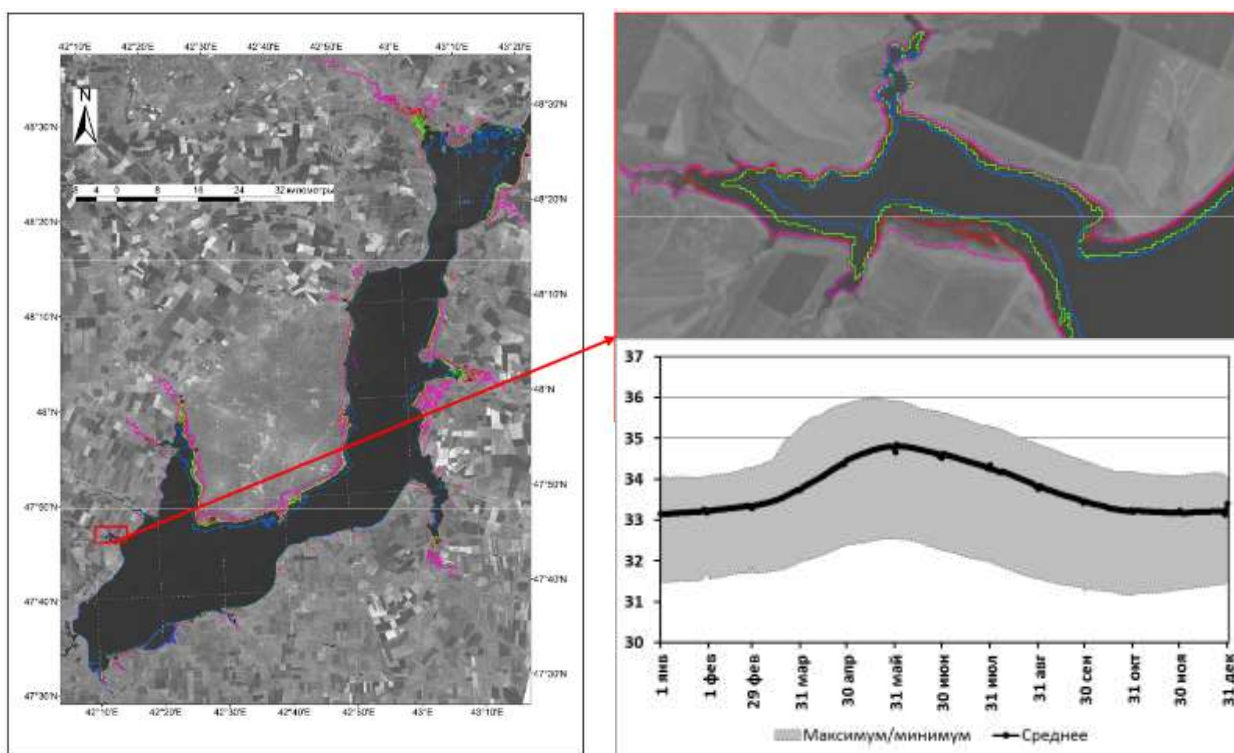


Рис. 1. На рисунках снимки (ДЗЗ Landsat-7;8): слева – все водохранилище. Справа – фрагмент. Справа внизу – график хода уровней Цимлянского водохранилища

Переходные ландшафты на Цимлянском водохранилище занимают 7% от площади зеркала вод для средних многолетних уровней и 21% для редких критических уровней последнего 20-летнего периода.

Этим методом определены высоты затопляемых побережий, для диапазона уровней от УМО до НПУ. Дополнительным источником данных, о высотах прилегающих территорий, были картографические данные разных типов: электронные ресурсы и отсканированные бумажные носители.

⁵ Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России <http://gis.vodinfo.ru/help/> (Дата обращения: 16.12.2025)

Альтернативный источник данных о высотах прибрежной зоны – радарная спутниковая съемка SRTM, дает сходные результаты вычисления площадей для уровня до 102 м, близкого к НПУ. Сравнение совпадающих территорий озерной части Рыбинского водохранилища дает для SRTM – 4578 км² и для Landsat – 4361 км², то есть отклонение равно –5% для данных ДЗЗ Landsat. Заметные отличия связаны: 1) с точностью данных SRTM, абсолютная ошибка по высоте до 6 м, а также – 2) с особенностями микро- и мезорельефа местности, которые препятствуют свободному перемещению водных масс временно затопленного и заболоченного побережья в водохранилище и таким образом не являются частью зеркала водохранилища, 3) с островами, особенно заболоченными, 4) с затапливаемыми-подтапливаемыми прибрежными лесами, 5) с притоками – учитываемая протяженность их и ограничения плотинами. По литературным данным: площадь водохранилища с островами – 4675 и площадь зеркала при НПУ – 4550 (Рыбинское..., 1972).

Для Цимлянского водохранилища – радарная спутниковая съемка SRTM, дает наиболее сходные результаты вычисления площадей для уровня 36м (НПУ). Сравнение совпадающих территорий озерной части Цимлянского водохранилища дает для Landsat – 2578 км² и для SRTM – 2675 км², то есть отклонение равно –3.8% для данных, полученных ДЗЗ Landsat (уровень 35.6 м, близкий к НПУ). Проектная документация указывает площадь при НПУ: 2624 км² (совпадает со средней для 2 предыдущих величин).

3D цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная по нашим высотным данным рельефа побережья, дополняется топографическими высотными данными, визуализация рельефа представлена на рисунке (рис. 2.). Имеющиеся топографические данные (высотные и батиметрические) накладываются на сетку высот по данным ДЗЗ – SRTM, с приоритетом первых материалов.

Средствами ГИС по такой ЦМР вычисляются площади затопления-осушки побережья (табл. 1.), определяются объемы сработки уровня воды для любого уровня стояния вод в пределах НПУ. Уровень водохранилища влияет также на высоту залегания грунтовых вод прилегающих территорий, что на низких берегах приводит к подтоплению (переувлажнению) и часто к заболачиванию. Средствами ГИС можно рассчитать контуры возможного стояния вод для любого допустимого уровня водохранилища, путем экстраполяции уже известных границ в ЦМР. Что позволяет выделить зону гидрологического влияния водохранилища на прилегающие территории, а также определить контуры переходных водно-наземных ландшафтов, связанных с водохранилищем (Балюк, 2007; Кутузов, 2022).



Рис. 2. Визуализация 3D цифровой модели рельефа окрестностей п. Борок и о. Радовский

Таблица 1. Площади затопления нескольких контрастных участков прибрежной полосы: защищенных мелководий и заболоченных территорий, сопряженных с Рыбинским водохранилищем (по результатам ГИС обработки данных ДЗЗ за 2013–2018 гг.).

Высота, м	Площадь, км ²				
	о. Радовский	о-вов Трясье	о. Святовской мох	залива Мшичинский	о-вов Мякса
Менее 99	0.423	0.189	1.227	0.358	9.008
99–100	2.076	1.099	6.536	1.324	21.892
100–101	4.259	2.496	10.105	3.419	39.487
101–102	6.598	5.357	16.938	6.656	60.578

В настоящей работе определены параметры положения территории в рельефе побережий, построена ЦМР побережий на основе гидрологических данных по уровенному режиму водохранилища и данных ДЗЗ. Создан ГИС проект «Акватерра» для прибрежной зоны Рыбинского и Цимлянского водохранилищ, по материалам которого проведена экстраполяция данных ЦМР побережий для выбранных высотных уровней. И по этим результатам получена морфометрическая характеристика 5 мелководий (Рыбинское водохранилище) и всей мелководной зоны в целом: форма, площадь и объем для каждого уровня воды.

Картографическая типология акватории и территории побережья, дает основания для распространения данных по проведенным измерениям физических параметров на однотипные участки всей территории. Это позволяет, в отличие от стандартных точечных замеров, использовать для оценки произвольно выбранных участков: данные гидрологических и гидрогеологических постов. Созданный ГИС проект позволяет автоматически построить изолинии (изогипсы), путем интерполяции полученных точечных данных по высотным отметкам, для произвольного участка территории. Такие ГИС-карты береговой зоны можно использовать для рекомендаций по выбору мест проведения точечных обследований. В данной работе используются «площадные измерения» на основе спутниковых данных достаточного уровня детализации и строится соответствующая цифровая модель рельефа (ЦМР).

Работа выполнена в рамках государственного задания № 124032100076-2.

Список литературы:

Балюк Т.В., Кутузов А.В., Назаренко О.Г. Экотонная система юго-восточного побережья Цимлянского водохранилища // Водные ресурсы. 2007. Т. 34. № 1. С. 104–112.

Дистанционные методы изучения водных экосистем // Монография. Географические методы изучения экосистем внутренних водоемов / Поддубный С.А. (отв. ред.); Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина. Ярославль: Филигрань, 2024. 206 с.

Кутузов А.В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экотонных систем «вода-суша» // Проблемы изучения краевых структур биocenозов. Материалы 2-й Всерос. Науч. Конф. С междунар. Участием. Саратов: изд-во Саратов. Ун-та, 2008. С. 59–62.

Кутузов А.В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода-суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища). // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 64–72.

Кутузов А.В. Геоэкологическая оценка динамики водно-прибрежных экосистем крупных равнинных водохранилищ методами ДЗЗ: диссертация ... кандидата географических наук: 1.6.21. Борок, 2022. 185 с.

Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л.: Изд-во «Наука», 1972. 364 с.

УДК 556.08:519.24

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОЙ СТАТИСТИКИ

Макаров Н.А., Гайдукова Е.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, NikitaMakarov11@mail.ru

Аннотация. Рассматривается применение методов многомерной статистики для прогнозирования стока рек Северо-Западного региона России, на примере рек Тихвинка и Мста. Анализируются факторы, влияющие на формирование водного режима рек, включая климатические условия. Предложены статистические модели, позволяющие повысить точность прогнозов и снизить неопределенность в оценке водных ресурсов региона. Результатом работы является вероятностный прогноз стока рек через копулу-функцию.

Ключевые слова: многомерная функция распределения, вероятностный прогноз, копула-функция.

Введение. Прогнозирование дождевых паводков является интересной и трудной задачей в науке о стоке, а число используемых методов и формул расчета исчисляется десятками (Соколовский, 1952). Отличительная особенность паводков от других опасных гидрологических явлений проявляется в их непериодической повторяемости, продолжительности от десятков минут до нескольких суток и возможности возникать в любое время года (Акимов, 2009). Основные факторы формирования паводочного стока можно разделить на две группы: метеорологические (характер, количество и продолжительность осадков) и факторы подстилающей поверхности (инфильтрация, скорость и время добегания) (Соколовский, 1952). Главная идея исследования заключается в разработке вероятностной модели краткосрочного прогноза расходов воды за период дождевых паводков. Методика основывается на представлении многомерного пространства (закона распределения) гидрометеорологических параметров через так называемую копулу-функцию (Макаров, 2025). Также будет использоваться ее модернизация для разложения n -мерной плотности в виде древовидной структуры – «*Vine Copula*». Подробную информацию о математическом аппарате используемых методов можно найти в работах (Деан, 2011; Aghakouchak, 2014; De Luca, Riviaccio, 2023; Joe, 1997; Kurowicka, Cooke, 2006).

Исследуемые речные бассейны. Для исследования были выбраны два водных объекта на территории Северо-Западного региона: река Тихвинка в Ленинградской области (длина составляет 144 км, площадь водосборного бассейна – 2140 км²), река Мста в Новгородской области (длина составляет 445 км, площадь водосборного бассейна – 23300 км²). Для соответствующих расчетов взяты гидропосты Горелуха и Потерпелицы, а также метеостанции Тихвин и Бологое. Для исследуемой территории дождевые паводки происходят с начала июня по конец сентября. В расчете используются следующие параметры суточной дискретности: количество (X) и продолжительность (RD) осадков, относительная влажность (RH), дефицит влажности воздуха (SMD), точка росы (DP) и расход воды (Q). Метеопараметры⁶ имеют непрерывный ряд с 1977 по 2023 год, а массив данных о расходах воды⁷ собран за несколько периодов (1977, 1979–1980, 2000–2002, 2004, 2008–2023 гг.).

Алгоритм модели. На первом этапе были отфильтрованы массивы по каждому дню за многолетний период. Для определенного дня формировалась обучающая выборка, состоящая из расхода воды в настоящий момент (Q_i), метеопараметров ($X_{i-t}, \dots, DP_{i-t}$) и расхода (Q_{i-t}) за временной сдвиг. К каждой переменной подбиралось одномерное распределение, и проводился перевод в диапазон $[0, 1]^n$. Далее определялась структура виноградной копулы-

⁶ <http://meteo.ru/> (дата обращения: 25.10.2025)

⁷ <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 20.06.2025).

функции и через нее воспроизводился многомерный закон, чтобы учесть влияние параметров друг на друга и увеличить обучающую выборку. Из сформированного закона распределения отбирались ряды Q_i и Q_{i-t} , между которыми строилась двумерная копула-функция. Через значение Q_{i-t} и его квантильное положение в многолетнем периоде условно моделировался вероятностный диапазон Q_i . Для оценки качества моделирования использовались такие критерии как двухвыборочный тест Колмогорова–Смирнова («KS2»), Андерсона–Дарлинга («AD2»), расстояние между плотностью («KDEd») и непрерывный ранжированный вероятностный скор («CRPS») по прогнозу.

Основной расчет. В качестве независимой выборки для р. Тихвинки рассматривался 2021 год. В этот год произошел один из сильнейших паводков за весь период наблюдений. Пример расчета представлен на рис. 1. На нем изображен результат моделирования за выбранный день (05.06.2021) в виде ядерной плотности вероятности и кривой обеспеченности. На рисунке видно, что сдвиг входного воздействия на 1 шаг назад имеет наилучшую сходимость плотности вероятности с исходным днем по всем критериям («KS2» = 0.087, «AD2» = -1.21 и «KDEd» = 0.102). Второй по эффективности результат получен при сдвиге на 4, однако, он незначительно отличается в «хвостовой» части зависимости со сдвигом 2 шага («AD2» = -0.69 < -0.64) и лучше по среднему значению («KS2» = 0.174 < 0.217). А худшее описание исходного ряда получается при сдвиге внешнего воздействия на 3 шага.

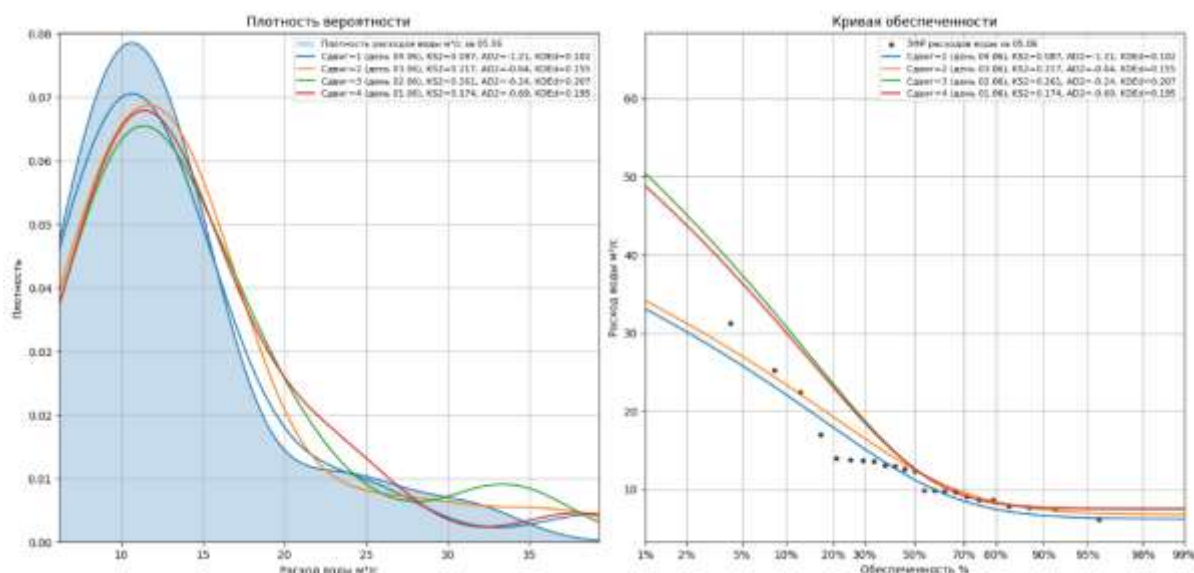


Рис. 1. Плотность вероятности и кривая обеспеченности для расходов воды за 30.06 на р. Тихвинка

Последующие расчеты проводились для всех дней с 01.06.2021 по 01.09.2021. На рис. 2 представлен прогноз расходов воды за каждый сдвиг. Дополнительно на график нанесен диапазон изменения квантиля 5–95% и 25–75%. Водный режим объекта характеризуется тем, что чаще всего на нем происходят короткие и резкие однопиковые паводки. Итоговый прогноз наиболее точно получился при сдвиге на 1 («SRPS» = 6,31 м³/с). Отмечено, что происходит заметное уменьшение расчетных расходов воды и рост ошибки при увеличении шага расчета. Для сдвига в 2 шага ошибка «SRPS» составляет 8.15 м³/с, сдвиг 3–9.44 м³/с, сдвиг 4–9.93 м³/с. Кроме того, в некоторые дни происходят резкие флуктуации квантильного диапазона. Подобное можно представить следующим образом – при совместном эффекте расчетного шага и значения расхода воды в какой-то из годов в многолетнем периоде происходил паводок, что отобразилось на графике виде пика плотности вероятности.

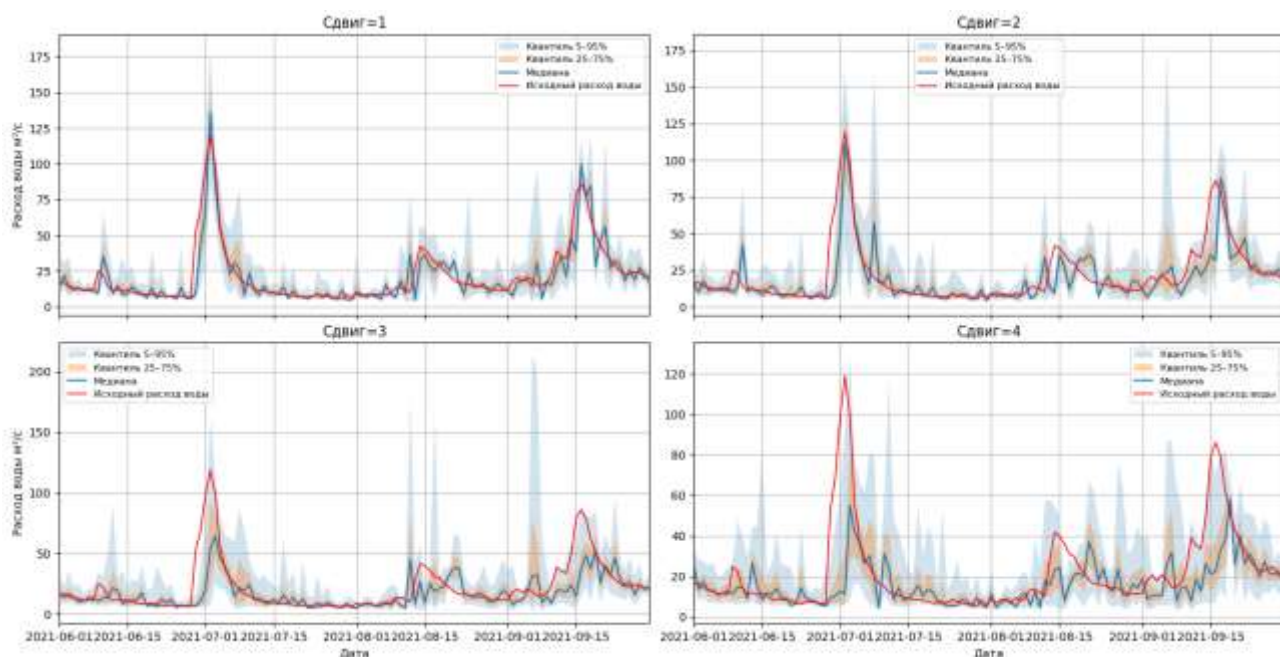


Рис. 2. Прогноз расходов воды за 2021 год на р. Тихвинка

Подобная методика применялась и для среднего по размерам водосбора реки Мста. Однако рассматривался другой временной период. На рис. 3 изображен прогноз расходов воды с 01.06.2017 по 30.09.2017 год на р. Мста. Паводковый режим на данном водном объекте имеет более плавный продолжительный спад и ступенчатый подъем. Ошибка расчета («CRPS») для сдвига в 1 шаг составляет 25.0 м³/с, сдвиг 2–26.9 м³/с, сдвиг 3–34.1 м³/с, сдвиг 4–28.4 м³/с. По графикам видно, что модель хуже справляется с более плавным изменением исследуемой величины. Однако, общий характер исходного ряда она в состоянии воспроизводить на должном уровне при маленьких сдвигках, а для улучшения прогнозной способности следует дополнительно применить статистическую фильтрацию (например, скользящее среднее) и учет антропогенной составляющей.

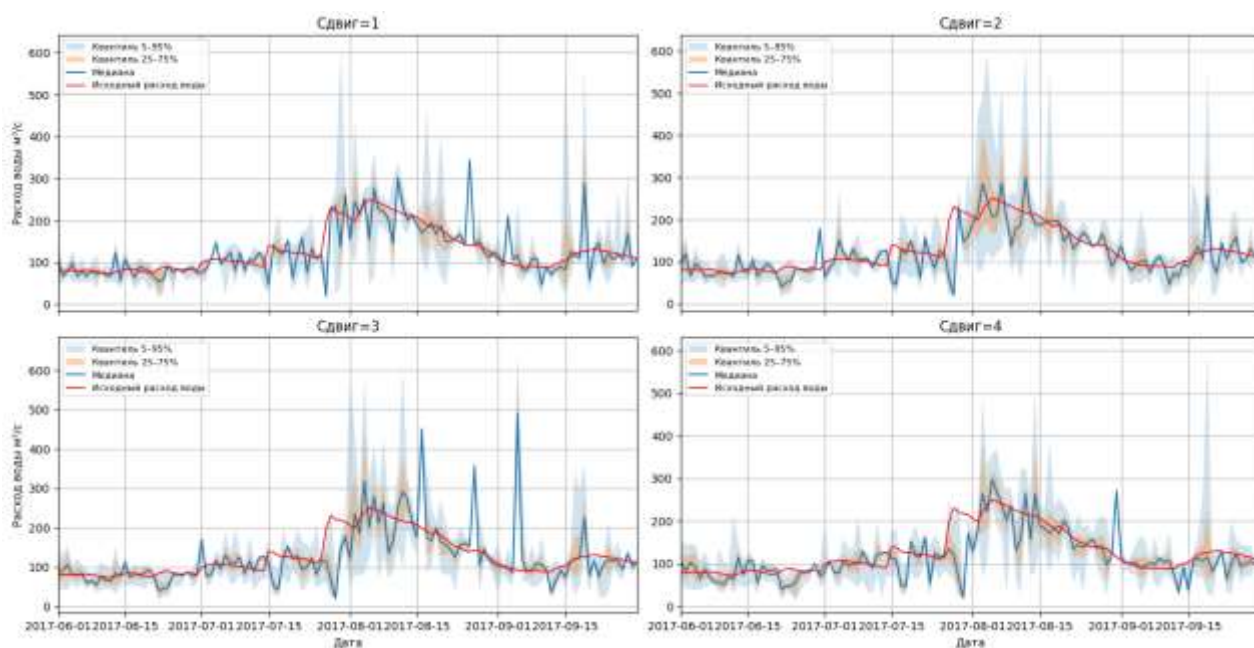


Рис. 3. Прогноз расходов воды за 2017 год на р. Мста

Заключение. По результатам исследования можно сделать вывод, что применение алгоритма построения многомерного закона распределения через копулу-функцию для прогнозирования дождевых паводков имеет неплохое качество на малых и средних водотоках. Резкие отклонения прогнозных величин от исходных возникают также в виду нелинейности процесса формирования стока. Представленный алгоритм в явном виде может быть модернизирован добавлением новых признаков, включая антропогенную составляющую. К тому же метод способен обходить принадлежность к временному масштабу, так как используются квантильные значения величин и их статистические параметры одномерных законов. Основным недостатком на данный момент являются резкие колебания прогнозных значений в некоторые моменты времени, которые следует устранить с помощью использования, например, фильтрации.

Список литературы:

- Акимов В. А., Дурнев Р. А., Соколов Ю. И. Опасные гидрометеорологические явления на территории России // Федеральное государственное бюджетное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий), 2009. С. 1–316.
- Деан Ф. Моделирование многомерных распределений с использованием копула-функций. Часть I // Прикладная эконометрика. 2011. №. 2 (22). С. 98–134.
- Макаров Н.А., Гайдукова Е.В. Моделирование многомерного распределения гидрометеорологических параметров с помощью копулы-функции // Гидрология и океанология. Казань, 2025. С. 136–145.
- Соколовский Д. Л. Речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1952. 492 с.
- Aghakouchak A. Entropy–copula in hydrology and climatology // Journal of Hydrometeorology. 2014. Vol. 15. No. 6. Pp. 2176–2189.
- De Luca G., Rivieccio G. Modeling and Simulating Rainfall and Temperature Using Rotated Bivariate Copulas // Hydrology. 2023. Vol. 10(12). P. 236.
- Joe H. Multivariate models and multivariate dependence concepts. CRC press, 1997.
- Kurowicka D., Cooke R. M. Uncertainty analysis with high dimensional dependence modelling. John Wiley & Sons, 2006.

УДК 556.5

ВАЛИДАЦИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ КАРТ ОПАСНОСТИ НАВОДНЕНИЙ JRC ДЛЯ РЕК РОССИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ И ОФИЦИАЛЬНЫМ КАРТАМ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ

Павлюкевич Е.Д.^{1,2}, Деркачева А.А.¹

¹Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия, epavlyukevich@hse.ru

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

Аннотация. В работе проведена комплексная валидация глобальных карт опасности наводнений (набор данных JRC, Joint Research Centre) для рек России с использованием трех независимых подходов: сравнения с контурами исторических затоплений по спутниковым снимкам, официальными картами зон затопления и данными базы опасных природных явлений. Целью исследования была оценка точности и применимости глобальных карт опасности наводнения для стратегической оценки рисков регионального уровня на территории России. Была выявлена чувствительность глобальных данных к ошибкам ЦМР, антропогенным факторам, а также зависимости от исходных метео данных, что ограничивает использование для локального проектирования, но подтверждает ценность для стратегического планирования на неосвоенных данными территориях.

Ключевые слова: валидация, глобальные карты опасности наводнений, дистанционное зондирование, зоны затопления, пространственный анализ, гидрологическое моделирование.

Введение. В условиях нарастающей частоты и интенсивности наводнений, связанных с изменением климата (Hirabayashi et al., 2013; Milly et al., 2002; Martel et al., 2020), важным направлением становится сплошное картирование зон затопления для адаптации и управления рисками (Wilby, Keenan, 2012). В мире развито создание карт затоплений разной обеспеченности, которые выполняются в рамках государственных инициатив (Environment Agency⁸, HORA⁹). В России такие материалы необходимы в том числе для создания региональных Планов адаптации к изменениям климата, но близкий аналог государственной программы ЗОУИТ (Зоны с особыми условиями использования территорий) направлен только на населенные пункты и 1%-обеспеченность. Глобальные наборы данных представляют собой ценный ресурс для быстрой и территориально масштабной оценки, особенно для областей, неосвоенных гидрологическими данными, что особенно актуально для России. Однако пределы их применимости для разных природных условий требует всесторонней проверки. Целью исследования является комплексная валидация глобальных карт опасности наводнений JRC¹⁰ на реках России с целью их использования в региональных стратегических оценках рисков.

Материалы и методы. В данном исследовании проводится валидация глобального набора данных о потенциальных зонах затопления, разработанного Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии (JRC). Эти наборы карт представляют собой растровые данные затопления для семи различных периодов повторяемости: 10, 20, 50, 75, 100, 200 и 500 лет (что соответствует обеспеченностям 10%, 5%, 2%, ~1.33%, 1%, 0.5% и 0.2%). Методология создания всей серии карт основана на реанализе глобальной системы

⁸ Environment Agency. (2019). Learn more about flood risk. Environment Agency, UK. <https://check-long-term-flood-risk.service.gov.uk/map> (дата обращения: 07.01.2026)

⁹ HORA. (2022). Hochwasserrisikozonierung. Natural Hazard Overview & Risk Assessment, Austria. <https://hora.gv.at/> (дата обращения: 07.01.2026)

¹⁰ Baugh, Calum; Colonese, Juan; D'Angelo, Claudia; Dottori, Francesco; Neal, Jeffrey; Prudhomme, Christel; Salamon, Peter (2024): Global river flood hazard maps. European Commission, Joint Research Centre (JRC). http://data.europa.eu/89h/jrc-floods-floodmapgl_rp50y-tif (дата обращения: 10.10.2025)

GloFAS¹¹ (1979 г. – наст. время) для построения многолетних рядов речного стока. На их основе формируются гидрографы заданных периодов повторяемости, которые подаются в двумерную гидродинамическую модель. Модель с пространственным разрешением ~90 м (на основе цифровой модели рельефа MERIT DEM) рассчитывает глубину затопления в каждой ячейке.

Методика валидации основана на трех независимых подходах (табл. 1): (1) Сравнение с контурами реальных исторических наводнений, дешифрованными по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), для чего были отобраны 10 тестовых участков в различных географических регионах, где за последние 25 лет происходили разрушительные половодья и паводки. Для корректного сопоставления с модельными расчетами различной обеспеченности, каждое конкретное событие было отнесено к определенному периоду повторяемости. Это было выполнено на основе статистического анализа максимальных уровней воды, зафиксированных на ближайших гидрологических постах за многолетний период наблюдений; (2) Сопоставление с утвержденными официальными картами зон затопления (ЗОУИТ), которые строятся в пределах населенных пунктов; (3) Дополнительная проверка по базе данных об опасных природных явлениях (БД ОПЯ), созданной НИУ ВШЭ на основе сообщений СМИ¹². Для количественной оценки точности использовались пространственные метрики качества: hit rate (HR) (стремится к 1), false alarm rate (FAR) (стремится к 0), critical success index (CSI) (стремится к 1).

Таблица 1. Исходные данные для валидации.

Тип данных	Ресурс	Описание
Глобальные карты опасности затопления	Global river flood hazard maps. European Commission, Joint Research Centre (JRC). http://data.europa.eu/89h/jrc-floods-floodmapgl_rp50y-tif (дата обращения: 10.10.2025)	Растровые данные значений глубины затопления (разрешение – 90 м)
<i>Данные для валидации</i>		
1. Данные дистанционного зондирования	Данные спутников Landsat 5,7,8,9, Sentinel-2	Космические снимки (разрешение – 30 и 10 м)
1.1. Максимальные уровни воды	Гидрологический ежегодник, Многолетние данные о режиме и ресурсах вод суши	Ряд максимальных уровней воды для определения обеспеченностей затопления
2. Зоны с особыми условиями использования территорий (ЗОУИТ, зоны затоплений)	Портал пространственных данных "Национальная система пространственных данных" (НСПД) https://nspd.gov.ru/ (дата обращения: 17.11.2025)	Векторные данные зон затопления
3. База данных об опасных природных явлениях (БД ОПЯ)	База данных «Опасные природные явления РФ по данным открытых источников» https://geography.hse.ru/georisks/opya (дата обращения: 09.12.2025)	Исторические свидетельства (факты) затоплений на основе СМИ

¹¹ Grimaldi, Stefania; Salamon, Peter; Disperati, Juliana; Zsoter, Ervin; Russo, Carlo; Ramos, Arthur; Carton, Corentin; Barnard, Chris; Hansford, Eleanor; Gomes, Goncalo; Prudhomme, Christel (2022): GloFAS v4.0 hydrological reanalysis. European Commission, Joint Research Centre (JRC). <http://data.europa.eu/89h/f96b7a19-0133-4105-a879-0536991ca9c5> (дата обращения: 07.11.2025)

¹² Анискина Т.А., Деркачева А.А., Краев Г.Н., Сакиркина М.А. База данных "Опасные природные явления РФ по данным открытых источников" [Электронный ресурс] / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва. 2024. Свидетельство Роспатента о регистрации 2024625468. <https://geography.hse.ru/georisks/opya> (дата обращения: 09.12.2025)

Ключевые результаты. Количественная оценка выявила пространственную неоднородность точности глобальных карт затопления. При валидации по данным ДЗЗ (рис. 1) метрики качества для всех исследуемых участков в среднем составили: HR – 0.93, FAR – 0.18, CSI – 0.77. При этом анализ показал, что точность неоднородна: на равнинных реках с широкими поймами она оказалась ниже (рис. 1б). Это, вероятно, связано с тем, что даже небольшая ошибка в цифровой модели рельефа (ЦМР) в таких условиях приводит к значительному смещению расчетных границ затопления. На реках с более выраженными, но не столь обширными поймами и в предгорьях соответствие было лучше (рис. 1а), что отразилось в более высоких значениях метрик. Кроме того, на территориях с низкой плотностью метеорологических наблюдений качество гидрологического моделирования может дополнительно снижаться из-за ограниченности входных метеоданных.

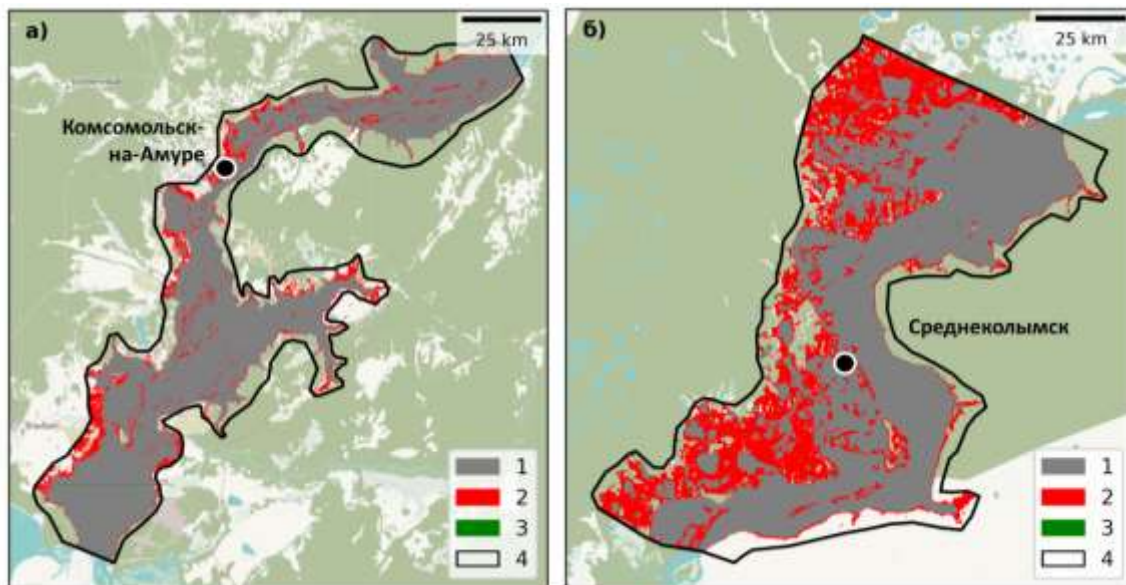


Рис. 1. Сравнение данных JRC и исторических затоплений на реках Амур близ г. Комсомольск-на-Амуре (обеспеченность 1%) (а) (снимок Landsat-7, 12.09.2013) и Колыма близ г. Среднеколымск (обеспеченность 2%) (б) (снимок Landsat-8, 17.05.2013): 1 – пересечение между данными JRC и границами исторического затопления, 2 – только данные JRC, 3 – только результаты дешифрирования исторического затопления, 4 – границы валидации

Средние метрики по результатам валидации по официальным картам затопления оказались ниже: HR – 0.86, FAR – 0.18, CSI – 0.71. Сравнение (рис. 2) также подтвердило проблемы на участках с антропогенным влиянием (водохранилища, мосты, сложные развязки) и сложной морфологией. Важно отметить, что официальные карты зон затопления, используемые в качестве одного из эталонов, сами являются продуктом расчетов и могут содержать неопределенности, связанные с используемыми ЦМР, гидрологическими расчетами и допущениями моделей.

Дополнительная проверка по БД ОПЯ позволила качественно оценить глобальные карты затоплений. Для 50 населенных пунктов в разных частях России, по которым в СМИ были зафиксированы факты затопления, проверялось, попадают ли они в зоны, обозначенные на глобальных картах. В 39 случаях (78%) карты корректно указывали на затопление, а в 11 случаях (22%) опасность была недооценена.

Выводы. Глобальные карты опасности наводнений могут служить ценным инструментом для стратегического планирования и первичной оценки рисков на региональном масштабе, особенно на неосвоенных данными территориях. Полученные результаты подтверждают их эффективность: при валидации по спутниковым данным средние

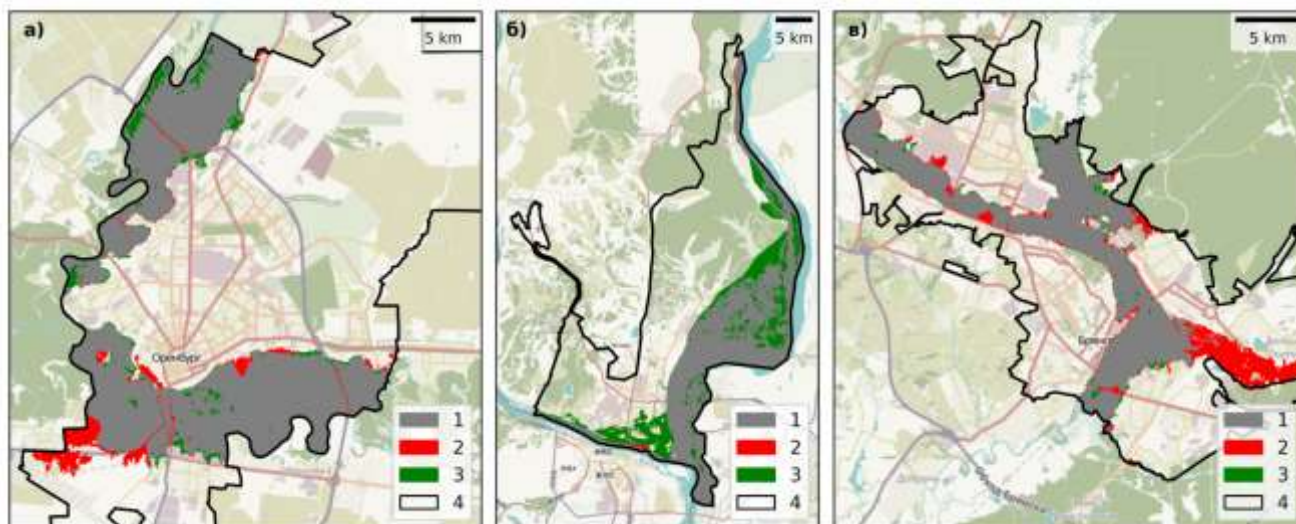


Рис. 2. Сравнение данных JRC и официальных карт зон затоплений (ЗОУИТ) (обеспеченность 1%) городов Оренбург (а), Благовещенск (б) и Брянск (в): 1 – пересечение между данными JRC и ЗОУИТ, 2 – только данные JRC, 3 – только данные ЗОУИТ, 4 – границы населенного пункта

метрики составили $HR = 0.93$, $FAR = 0.18$, $CSI = 0.77$; при сравнении с официальными картами $HR = 0.86$, $FAR = 0.18$, $CSI = 0.71$; проверка по базе ОПЯ подтвердила корректное определение зон затопления в 78% случаев. Однако применение данных карт для локального инженерного проектирования в России ограничено ключевыми факторами: чувствительностью к ошибкам ЦМР (особенно на равнинных реках с широкими поймами), игнорированием антропогенной инфраструктуры (мосты, крупные развязки и т.д.), а также зависимостью результатов моделирования от исходных метео данных, включая пространственное разрешение и ассимиляцию данных для реанализа.

Список литературы:

- Hirabayashi Y., Mahendran R., Koirala S., Konoshima L., Yamazaki D., Watanabe S., Kim H., Kanae S. Global flood risk under climate change // *Nature Climate Change*. 2013. Vol. 3. № 9. P. 816–821. DOI: 10.1038/nclimate1911.
- Milly P.C.D., Wetherald R.T., Dunne K.A., Delworth T.L. Increasing risk of great floods in a changing climate // *Nature*. 2002. Vol. 415. № 6871. P. 514–517. DOI: 10.1038/415514a.
- Wilby R.L., Keenan R. Adapting to flood risk under climate change // *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2012. Vol. 36. № 3. P. 348–378. DOI: 10.1177/0309133312438908.
- Martel J.-L., Mailhot A., Brissette F. Global and Regional Projected Changes in 100-yr Subdaily, Daily, and Multiday Precipitation Extremes Estimated from Three Large Ensembles of Climate Simulations // *Journal of Climate*. 2020. Vol. 33. № 3. P. 1089–1103. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0764.1.

УДК 556.5

РАСЧЕТ ПРИТОКА ВОДЫ К ПРИЛЕДНИКОВОМУ ОЗЕРУ

Распутина В.А.¹, Пряхина Г.В.¹, Зырянова Д.С.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.

²ООО «Спецгеологоразведка», Киров, Россия.

lerasputina88@gmail.com

Аннотация. В настоящем исследовании приведены результаты апробации разработанной авторами методики расчета притока воды к приледниковому озеру Нурган (хребет Цамбагарав, Монгольский Алтай). Установлено, что разработанная модель формирования притока воды к горному озеру очень хорошо описывает суточный ход таяния ледника и притока воды к озеру.

Ключевые слова: приледниковые озера, математическое моделирование, расчет таяния ледника

Основным источником питания высокогорных рек и озер является ледниковый сток; его объем и распределение во времени определяют гидрологический режим водных объектов. В результате происходящего таяния ледников могут образовываться прорывоопасные озерно-ледниковые комплексы в районах деградации оледенения. Для оценки возможного прорыва водоема и обеспечения безопасности горных регионов необходимы оценки величин притока воды к озеру с его водосбора.

В методике водосбор разбивается на высотные зоны с интервалом 100 м. Выбор высотного интервала обусловлен тем, что как правило градиент изменения осадков, температуры воздуха и других метеорологических характеристик рассчитывается на каждые 100 м по высоте. В пределах каждой высотной зоны выделяются условно однородные поверхности (СФК): ледник, снежник, морена, озеро.

В основе модели лежит водно-балансовое соотношение описывающее изменение объема воды в озере $\Delta W_{оз}$ за некоторый промежуток времени Δt (1):

$$\Delta W_{оз} = W_{п} - W_{о}, \quad (1)$$

где $W_{п}$ – приток воды в озеро, м³/сут; $W_{о}$ – отток воды из озера, м³/сут.

Приток воды к озеру

Приток воды в озеро $W_{п}$ для одних суток вычисляется как:

$$W_{п} = \int_1^n [W_{л,i} + W_{сн,i} + W_{м,i}] + A_{оз} \times 10^{-3} \times (P_{оз} - E_{оз}), \quad (2)$$

где n – количество высотных зон; $A_{оз}$ – площадь озера, м²; $P_{оз}$ – слой осадков, выпавших над поверхностью озера, мм; $E_{оз}$ – испарение с поверхности озера, мм; $W_{л,i}$, $W_{сн,i}$, $W_{м,i}$ – соответственно объем суточного таяния ледника, снега/снежника и сток с неледниковой территории в высотной зоне i , м³.

Приток с ледниковой части

Поступление воды за счет таяния льда и фирна $W_{л,i}$ может быть рассчитано с помощью следующего выражения:

$$W_{л,i} = A_{л,i} \times 10^{-3} \times (h_{л,i} + P_{л,i} - E_{л,i}), \quad (3)$$

где $A_{л,i}$ – площадь ледника в высотной зоне i , м²; $h_{л,i}$ – слой абляции в высотной зоне i , мм; $P_{л,i}$ – слой осадков, выпавших над поверхностью ледника в высотной зоне i , мм; $E_{л,i}$ – испарение талой воды с поверхности ледника в высотной зоне i , мм.

Слой абляции (h_L , мм) рассчитывается на основе теплового баланса ($\omega, \frac{\text{кал}}{\text{кв}} \times \text{см}$) в каждой высотной зоне (Рец и др., 2018):

$$h_L = \frac{10 \times \omega}{L} = \frac{\omega}{8}. \quad (4)$$

Тепловая энергия ω определяется с помощью уравнений теплового баланса:

$$\omega = S_{\text{ср}} + E_3 + E_a + \omega_T \pm S, \quad (5)$$

где $S_{\text{ср}}$ – приходная коротковолновая радиация, кал/см²; E_a – встречное излучение атмосферы, кал/см²; E_3 – длинноволновое излучение земной поверхности, кал/см²; ω_T – турбулентный теплообмен с атмосферой, кал/см²; S – тепло, приносимое с дождевыми осадками, кал/см².

Расчет таяния снега $W_{\text{сн},i}$ для высотной зоны i производится по формуле:

$$W_{\text{сн},i} = A_{\text{сн},i} \times 10^{-3} \times (h_{\text{сн},i} + P_{\text{сн},i} - E_{\text{сн},i}), \quad (6)$$

где $A_{\text{сн},i}$ – площадь снега в высотной зоне i , м²; $h_{\text{сн},i}$ – слой таяния снега в высотной зоне i , мм; $P_{\text{сн},i}$ – слой осадков, выпавших над поверхностью снежного покрова в высотной зоне i , мм; $E_{\text{сн},i}$ – испарение снеговой талой воды в высотной зоне i , мм.

Расчет испарения со снега и льда выполняется по формуле Кузьмина П.П. (Кузьмин, 1961):

$$E = (0.18 + 0.098u)(e_{\text{п}} - e_{200}) \quad (7)$$

u – скорость ветра, м/с; $e_{\text{п}}$ и e_{200} – дефицит влажности воздуха у поверхности и на высоте 2 м соответственно, мбар.

Приток с неледниковой части бассейна

Сток с неледниковой части $W_{\text{м},i}$ для каждой высотной зоны i определяется по формуле:

$$W_{\text{м},i} = A_{\text{м},i} \times 10^{-3} \times (P_{\text{м},i} - E_{\text{м},i}), \quad (8)$$

где $A_{\text{м},i}$ – площадь морены в высотной зоне i , м²; $P_{\text{м},i}$ – слой осадков, зафиксированных над моренной частью высотной зоны i , мм; $E_{\text{м},i}$ – испарение на морене в высотной зоне i , мм.

В качестве допущения примем, что все осадки просачиваются в рыхлый моренный материал и без потерь на фильтрацию в более глубокие горизонты в течение суток оказываются в водоеме. Это допущение по фактическим наблюдениям не противоречит протеканию процесса на малых водосборах.

Испарение с поверхности морены

Расчет испарения с почв, грунтов, осыпей, производится для случаев, когда их влажность достигает полной влагоемкости. Формула для расчета испарения с увлажненной поверхности почвы, лишенной растительности, основана на разности градиентных измерений (Константинов, 1968):

$$E = \left(\frac{0.018(T_{\text{пов}} - T_{\text{в}})}{u} + 0.097u \right) (e_{\text{п}} - e_{200}), \quad (9)$$

где $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности почвы, °C; $T_{\text{в}}$ – температура воздуха на высоте 2 м, °C; u – скорость ветра, м/с; $e_{\text{п}}$ и e_{200} – дефицит влажности воздуха у поверхности и на высоте 2 м соответственно, мбар.

Апробация разработанной методики расчета была проведена на основе полученных полевых материалов за период со 2 по 17 августа 2024 г. для моренно-подпрудного озера Нурган (хребет Цамбагарав, Северо-Западная Монголия). Были выполнены расчеты таяния ледника Эрегтийн и притока воды к озеру Нурган с использованием разработанной математической модели. Качество моделирования определялось на основе визуального сравнения графиков рассчитанных и наблюдаемых уровней воды (совпадение времени наступления максимальных и минимальных значений); анализа статистических параметров: средних значений абсолютной ($\bar{\Delta}$, м) и относительной ($\bar{\delta}$, %) ошибок; максимальных и минимальных значений абсолютной и относительной ошибок ($\Delta_{\text{макс}}$, м; $\delta_{\text{макс}}$, %; $\Delta_{\text{мин}}$, м; $\delta_{\text{мин}}$, %, соответственно); коэффициента корреляции ($K_{\text{корр}}$). Коэффициент корреляции $K_{\text{корр}}$ сравнивался с критическим значением, равным 0.7.

Критическое значение коэффициента корреляции ($K_{\text{корр}}$) рассчитывалось по формуле:

$$K_{\text{крит}} = \frac{2}{\sqrt{n+2}} = 0.47$$

Результаты моделирования таяния ледника Эрегтийн представлены на рис. 1.

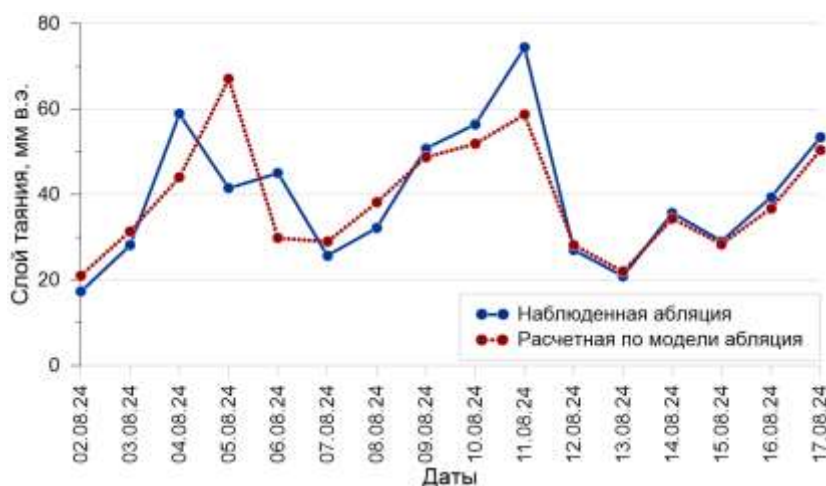


Рис. 1. Суточный ход наблюдаемой и расчетной абляции ледника Эрегтийн

Статистические характеристики расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики расчета величины таяния ледника

$K_{\text{корр}}$	$\bar{\Delta}$, мм	$\bar{\delta}$, %	$\Delta_{\text{макс}}$, мм	$\delta_{\text{макс}}$, %	$\Delta_{\text{мин}}$, мм	$\delta_{\text{мин}}$, %
0.78	–1.0	1.6	25.6	61.6	–0.7	–2.4

Согласно выполненным расчетам, коэффициент корреляции между рассчитанными величинами таяния ледника Эрегтийн и наблюдаемыми составляет 0.78, что больше $K_{\text{крит}}$. Это свидетельствует о хорошей сходимости наблюдаемых и модельных величин таяние и о том, что математическая модель хорошо описывает ход суточного таяния. Сравнение также показало, что график расчетной абляции в целом повторяет суточный ход наблюдаемой абляции за исключением периода 4–6 августа, когда величины расчетной и наблюдаемой абляции находятся в противофазе. Стоит обратить внимание на то, что 11 августа расчетная по модели величина таяния на 16 мм ниже, чем измеренная. Это можно объяснить тем, что 11 августа наблюдалась низкая облачность, которая вероятно привела к тому, что более теплый воздух задерживался на территории водосбора, что привело к более высокому таянию ледника. В настоящий момент времени данный процесс не учитывается. Согласно

выполненным расчетам, суммарное таяние ледника составило 620 мм в.э., а суммарная измеренная абляция за период наблюдения составила 635 мм в.э. Абсолютная ошибка составила 15 мм (относительная ошибка –2.5%), что является хорошей сходимостью.

Хорошее качество моделирования величины таяния ледника позволило далее выполнить расчет притока воды к озеру Нурган (рис. 2).

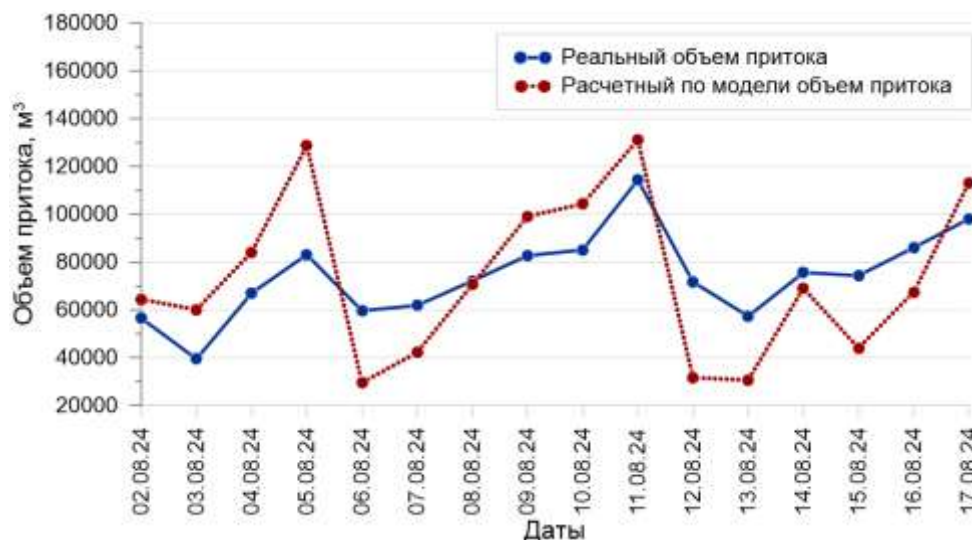


Рис. 2. Суточный ход наблюдаемого и расчетного объема притока воды к озеру Нурган

Статистические характеристики расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2. Статистические характеристики расчета величины притока воды к озеру

$K_{\text{корр}}$	$\bar{\Delta}$, м³	$\bar{\delta}$, %	$\Delta_{\text{макс}}$, м³	$\delta_{\text{макс}}$, %	$\Delta_{\text{мин}}$, м³	$\delta_{\text{мин}}$, %
0.72	–910	–2.0	45545	–56.0	–1470	–2.0

Коэффициент корреляции $K_{\text{корр}}$ между рассчитанными с использованием разработанной модели объемами притока и объемами притока к озеру Нурган, полученными на основе расчета водного баланса по наблюдаемым данным составил 0.72. Это говорит о том, что ход расчетных по модели объемов притока повторяет ход реальных объемов притока, что в свою очередь свидетельствует об очень хорошем качестве моделирования и о том, что модель хорошо описывает суточный ход величины притока воды к озеру. Согласно выполненным модельным расчетам, суммарный за период наблюдения приток составил 1170574 м³, а суммарный реальный приток равен 1185141 м³. Абсолютная ошибка составила –14567 м³ (относительная ошибка (–1%), что свидетельствует об очень хорошем качестве моделирования.

Таким образом, выполненная апробация математической модели на данных, полученных при выполнении экспедиционных работ в районе ледника Эрегтийн, показала, что разработанная модель формирования притока воды к горному озеру очень хорошо описывает суточный ход таяния ледника и притока воды к озеру, что позволяет ее использовать для моделирования уровней воды озера.

Список литературы:

Константинов А.Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 532 с.

Кузьмин П.П. Процессы таяния снежного покрова: Монография. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 344 с.

Рец Е.П., Петраков Д.А., Шпунтова А.М. Использование физико-математической модели таяния снега и льда A-Melt для реконструкции баланса массы ледников Внутреннего Тянь-Шаня // III Виноградовские чтения. Грани гидрологии: сборник докладов международной научной конференции (Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г.). СПб.: Научно-технологические, 2018. С. 122–126.

УДК 626.81 : 504.4.062.2

ОПЫТ ОЦЕНОК ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ В РЕЧНЫХ БАСЕЙНАХ РАЗНОГО ИЕРАРХИЧЕСКОГО УРОВНЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕК ОБИ И ИРТЫША)

Рыбкина И.Д.

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия, irina.rybkina@mail.ru

Аннотация. В материалах доклада представлено обобщение опыта оценок удельной водообеспеченности в речных бассейнах разного иерархического уровня – от крупных до средних и малых по площади и длине реки в зависимости от наличия исходной гидрологической информации и социально-экономических потребностей. На примере Обь-Иртышского бассейна получены результаты оценок потенциальной водообеспеченности, бассейна Иртыша и его притоков – с учетом водохозяйственных ограничений и безвозвратных изъятий, для отдельных участков рек – при наличии длинного ряда наблюдений гидрологических данных произведен расчет реальной водообеспеченности.

Ключевые слова: водные ресурсы, периоды малой водности, перспективное водопотребление, безвозвратное изъятие, региональный и субрегиональный уровень оценок

Введение. В целях разработки документов стратегического планирования субъектов федерации предлагается проводить оценки водно-ресурсного потенциала регионов, которые в настоящее время используются только в проектах СКИОВО. В условиях недостаточности гидрометеорологической информации по водным объектам Сибири возникают определенные сложности методического плана, требующие разрешения путем создания алгоритма расчетов.

Материалы и методы. Региональный уровень оценок водно-ресурсного потенциала предполагает достаточным проведение расчетов на основе данных среднесезонных значений речного стока, т.е. с учетом потенциальных водных ресурсов (Водные ..., 2008). Как показывают исследования (Кошелева, Зиновьев, 2017), минимальным необходимым периодом для таких расчетов признаны 10-летние временные отрезки. Вместе с тем, такие исследования позволяют провести только сравнительные оценки крупных регионов и не дают возможности представления детальных результатов по территориям, характеризующимся малыми значениями речного стока.

На субрегиональном уровне для большей детальности оценок применяется расчет реальных водных ресурсов (Водные ..., 2008), который делает возможным прогноз в периоды минимальной трехлетней водности с учетом безвозвратного водопотребления, что важно для перспективного развития экономики. Необходимым условием также является учет современных и будущих потребностей в водных ресурсах на примере отдельных водохозяйственных участков (ВХУ) и речных бассейнов (Проект, 2014).

Результаты и их обсуждение. Для регионов Обь-Иртышского бассейна проведены разноуровневые оценки водно-ресурсного потенциала – в границах крупных подбассейнов, а также по отдельным ВХУ и муниципальным образованиям (МО), часть из них опубликована (Рыбкина, 2012; Рыбкина и др., 2015; Рыбкина, 2016; Винокуров, Рыбкина и др., 2018). Обобщение материала позволило разработать алгоритм водоресурсного обоснования долгосрочного регионального развития изучаемых субъектов (Рыбкина, 2020), который может быть применен для других территорий.

В основу алгоритма положен ландшафтно-бассейновый принцип оценки формирования и использования водных ресурсов (рис. 1). Обосновано показаны природообусловленность формирования региональных систем водопользования, а также детерминированность антропогенных факторов их функционирования и развития.

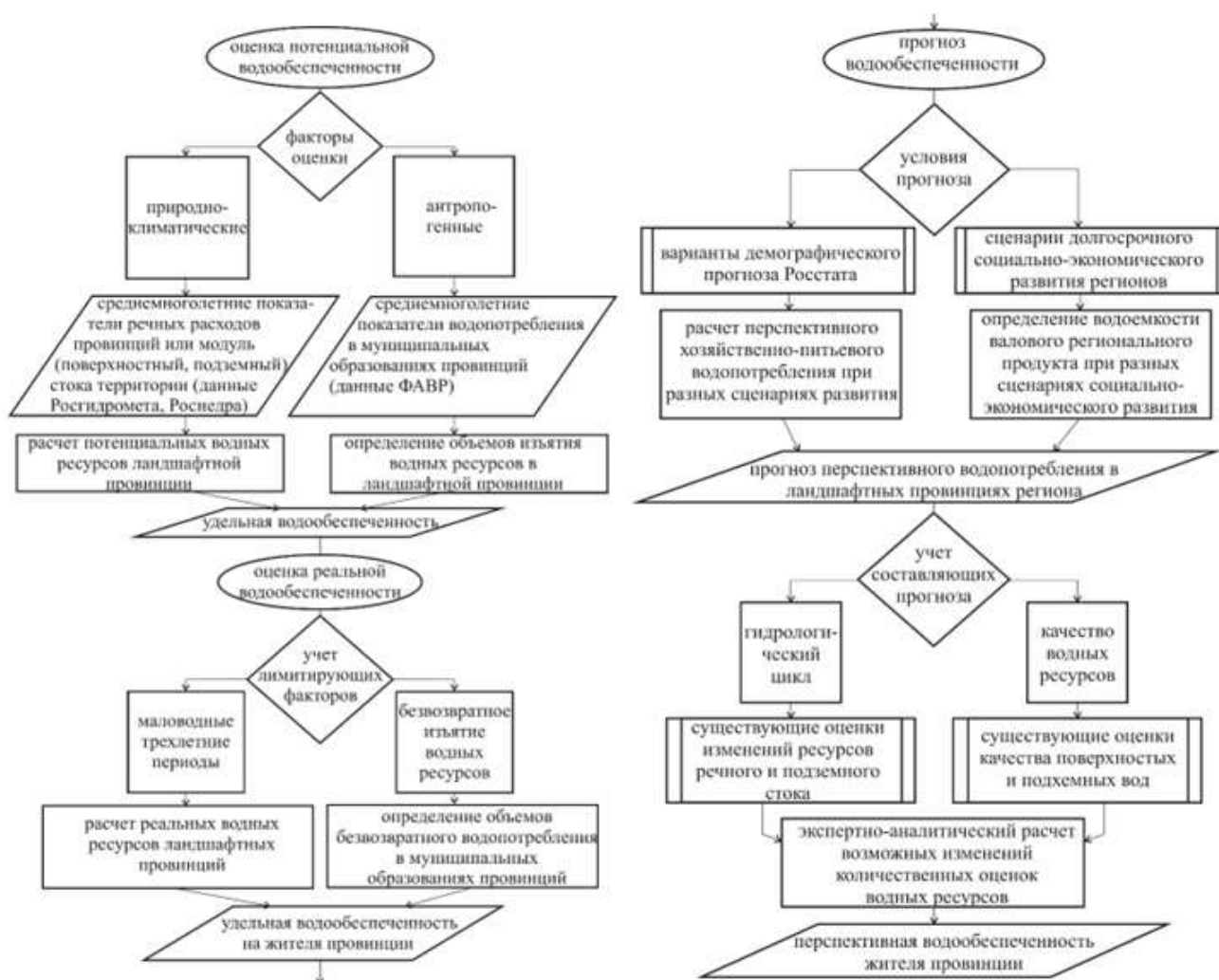


Рис. 1. Алгоритм оценки водоресурсной обеспеченности территорий Западной Сибири (Рыбкина, 2020)

Представленные оценки водообеспеченности на примере крупных речных бассейнов – Оби, Иртыша, Чулыма, Бии, Катуня и др. – могут быть основаны на среднегодовых значениях речного стока, включая его местную и транзитную составляющие, и выступать как лимитирующий фактор социально-экономического развития территорий, определяя в той или иной степени перспективность и ограниченность управленческих механизмов стратегическим планированием в регионах.

Для бассейнов Оби и Иртыша, а также других крупных рек и их участков на основе многолетних наблюдаемых данных выполнены сценарные прогнозы водности на перспективу до 2040 гг. (Зиновьев, Кошелева, 2018; Кошелева, 2023; Кошелева, 2024; Кошелева, 2025).

На отдельных участках рек и их бассейнов выполнены более детальные расчеты при условии наличия длинных рядов наблюдений за стоком. Из всех гидрологических постов Оби и Иртыша выбраны те из них, которые имеют максимальный ряд наблюдений (50–60 лет и более), позволяя выделить несколько трехлетних периодов низкой водности. Для таких промышленных и индустриальных центров расчет проведен с определением реальных водных ресурсов с учетом безвозвратного водопотребления, а также для территорий МО бессточной области Обь-Иртышского междуречья (Рыбкина, 2020).

Как показывает опыт оценок, для водохозяйственной практики особенно требуются гидрологические расчеты по данным 50% (оросительные системы) – 95% (водохозяйственные системы питьевого водоснабжения населенных пунктов) обеспеченности. При имеющихся многолетних данных это позволяет произвести расчет с учетом длительных маловодных

периодов, объемов безвозвратного водопотребления и будущих потребностей в водных ресурсах по отдельным видам экономической деятельности, что несомненно улучшает качество результатов оценки водообеспеченности территорий. На подобных результатах разработаны детальные прогнозы водно-ресурсного потенциала и скорректированы направления развития водохозяйственной деятельности, а также становится возможным учесть передачу части речного стока, накопленную водохранилищами, как это сделано в бассейне р. Иртыша (рис. 2) (Орлова, Рыбкина, 2025; Жерелина, Орлова, Рыбкина, 2024).



Рис. 2. Доля изъятия поверхностных водных ресурсов в бассейне р. Иртыш в годы 95% обеспеченности (Жерелина, Орлова, Рыбкина, 2024)

Выводы. Стратегическое управление развитием регионов РФ требует научно обоснованного методического подхода к оценкам водно-ресурсного потенциала субъектов и их МО. Анализ и прогноз водообеспеченности должен основываться на корректности системы критериев оценок водных ресурсов с учетом периодов минимальной и максимальной водности. Определение целевых установок перспективных потребностей и безвозвратного водопотребления также является необходимым условием выполнения таких оценок. При этом на каждом иерархическом уровне в зависимости от наличия и полноты данных требуется экспертиза имеющейся гидрологической информации, позволяющая выработать оригинальные приемы и методы оценок водообеспеченности стратегических направлений развития регионов.

Список литературы:

Винокуров Ю.И., Рыбкина И.Д., Стоящева Н.В., Губарев М.С., Курепина Н.Ю., Резников В.Ф., Магаева Л.А. Ландшафтно-бассейновый подход в оценках водообеспеченности населения и экономики регионов Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2018. № 1. С. 31–41.

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.

Жерелина И.В., Орлова Е.С., Рыбкина И.Д. Водно-ресурсные аспекты устойчивого развития трансграничных территорий России и Казахстана (на примере бассейна р. Иртыш) // Географические и эколого-экономические проблемы трансграничного сотрудничества в новых геополитических условиях. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук, 130-летию Троицкосавско-Кяхтинского отделения Приамурского отдела Императорского Русского географического общества и 50-летию Байкало-Амурской магистрали. Улан-Удэ, 2024. С. 108–112.

Зиновьев А.Т., Кошелева Е.Д. Произошедшее и ожидаемое изменение объема стока рек Обь-Иртышского бассейна под влиянием природно-климатических факторов // Вопросы географии. Сб. 145 Гидрологические изменения / ред. В. М. Котляков, Н. И. Коронкевич, Е. А. Барабанова. М.: Издательский дом «Кодекс», 2018. С. 77–88.

Кошелева Е.Д. Водность рек Алтайского края в условиях изменения климата // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. № 2 (69). С. 5–16.

Кошелева Е.Д. Изменение объемов стока рек Томской и Кемеровской областей и прогнозы их водностей // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. Материалы V международной научной конференции, приуроченной к 100-летию со дня рождения академика О.Ф. Васильева. Барнаул, 2025. С. 56–59.

Кошелева Е.Д. Оценка изменения стока рек Новосибирской области в условиях климатического потепления // Аграрная наука - сельскому хозяйству. Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции. В 2-х книгах. Барнаул, 2024. С. 51–54.

Кошелева Е.Д., Зиновьев А.Т. Анализ изменения водности рек Обь-Иртышского бассейна в условиях изменения климата // Известия АО РГО. 2017. № 3. С. 80–86.

Орлова Е.С., Рыбкина И.Д. Оценка фактического водопотребления населения сельских поселений Обь-Иртышского междуречья // Географическая среда и живые системы. 2025. № 1. С. 67–86.

Проект Схемы комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Обь. Кн. 1. Общая характеристика речного бассейна. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2014. 497 с.

Рыбкина И.Д. Водоресурсное обеспечение долгосрочного регионального развития Западной Сибири (на примере Обь-Иртышского бассейна): дис. на соиск. уч. ст. д.г.н. по спец. 25.00.36. «Геоэкология». Барнаул, 2020. 249 с.

Рыбкина И.Д. Оценка водоресурсной обеспеченности существующих потребностей населения и экономики регионов Сибири // Мир науки, культуры и образования. 2012. № 1 (32). С. 327–332.

Рыбкина И.Д. Оценка и прогноз водообеспеченности Омской области // Известия РАН. Серия географическая. 2016. № 1. С. 115–122.

Рыбкина И.Д., Стоящева Н.В., Магаева Л.А., Губарев М.С., Резников В.Ф., Курепина Н.Ю. Оценка водообеспеченности регионов Западной Сибири // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: труды Четвертой Всерос. науч. конф. с межд. участием / отв. ред. М. В. Болгов. Москва: ИВП РАН, 2015. С. 512–514.

УДК 502.3

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ООПТ «РОМАНЦЕВСКИЕ ГОРЫ»

Соловьева А.Д.

Государственный университет просвещения, Москва, Россия, *kotyasha02@mail.ru*

Аннотация. В данной статье представлены результаты мониторинга поверхностных вод, проведенного в 2024 и 2025 гг. Рассматриваются гидрологическая и гидрохимическая характеристики природных вод Ушаковского карьера, расположенного в границах ООПТ «Романцевские горы». Лабораторный анализ выявил гидрохимическую структуру вод, в которой ряд веществ в десятки раз превышают установленные нормативы, некоторые вещества превышают нормативы менее, чем в 10 раз, и ряд веществ присутствуют в воде в незначительных количествах.

Ключевые слова: мониторинг поверхностных вод, Романцевские горы, кислотное выщелачивание, тяжелые металлы, алюминий, превышение ПДК, техногенные водоемы.

Восстановление нарушенных природно-антропогенных ландшафтов и формирование рекреационных территорий в настоящее время приобретают возрастающую практико-научную значимость (Бочев, Иванова, 2022). В качестве одного из таких объектов выступают Романцевские горы (дер. Кондуки, Узловский район, Тульская область) – природно-антропогенный рекреационный комплекс, на территории которого сосредоточена система затопленных карьерных водоемов и мощные отвалы вскрышных пород. Местные жители уже используют эти ландшафты в рекреационных целях; в 2018 г. территория Романцевских гор получила статус особо охраняемой природной территории местного значения (Узловский район).

Общая площадь комплекса составляет 1289.2 га. В его пределах размещается сеть водоемов суммарной площадью 172.6 га и глубиной от 10 до 79 м, тогда как площадь отвалов составляет порядка 108.6 га. В ближайшей перспективе региональные власти планируют развитие туристической инфраструктуры с последующим формированием туристско-рекреационного кластера и продвижением направлений экотуризма, что усиливает потребность в научно-обоснованных программах по восстановлению и охране ландшафтов.

Романцевские горы являются результатом хозяйственной деятельности Ушаковских карьеров Подмосковного угольного бассейна. Разработка велась в основном открытым способом, угленосные пласты залегали неглубоко; горные работы были прекращены в 1996 г., после чего выработки оказались затоплены. Остаточные отвалы высотой 34–37 м со временем частично рекультивировались: смена сукцессионных стадий привела к зарастанию терриконов древесной и травяной растительностью, а очертания озер приобрели более естественные формы, что сформировало рельеф, нетипичный для данной части региона и привлекательный для рекреационного использования.

Объектом исследования в настоящей работе выступает водоем одного из затопленных Ушаковских карьеров (рис. 1).

Предметом исследования является мониторинг поверхностных природных вод этого карьера с последующей оценкой их гидрологического режима и гидрохимического состава.

Отбор и аналитическое исследование поверхностных вод проводились с целью гидрохимической и гигиенической оценки состояния гидрографического объекта, используемого в рекреационных целях и потенциально подверженного антропогенным нагрузкам. Пробоотбор осуществлялся осенью и весной 2024 и 2025 гг. в соответствии с положениями ГОСТ 31861-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб». В рамках эколого-геохимических работ выполнялись точечные отборы проб: единичные пробы брались в центральной части водоема из подповерхностного слоя (около 0.5 м от поверхности) объемом 1 л (Моисеенко, Гашкина, 2010).



Рис. 1. Местоположение исследуемого водоема и точка отбора анализируемых проб

Используемые водоотборные емкости (полиэтиленовые бутылки) предварительно ополаскивались отбираемой водой и заполнялись «под горло» без образования воздушных пузырей во избежание дегазации и изменения состава проб.

Для обеспечения сохранности проб и минимизации внесенного погрешностью полевого этапа отбора, отобранные образцы помещались в охлаждающий транспортировочный контейнер и доставлялись в лабораторию «Ион» (г. Москва) в течение 5 часов после отбора. При необходимости проводилась консервация проб в соответствии с методическими требованиями для последующего определения металлов и других параметров.

Полевая программа включала мероприятия по контролю качества – отбор полевых проб-контролей, повторных проб и дублей для оценки воспроизводимости и возможной контаминации.

Аналитические исследования в 2024 г. по развернутой программе включали определение общей жесткости, общего железа, нитрат-анионов, водородного показателя (рН) и общего солесодержания. В 2025 г. была выполнена расширенная гидрохимическая характеристика той же точки отбора: определялись общая жесткость, общее железо, нитраты, рН, общее солесодержание, а также мутность, цветность и перманганатная окисляемость.

Методологическая основа количественных измерений включала нормативные методики, в том числе ПНД Ф 14.1:2:4.135-98 «Количественный химический анализ вод» и иные подтвержденные лабораторные методики, применимые для соответствующих параметров.

Интерпретация полученных результатов проводилась на основе гигиенических нормативов и требований СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», с учетом критериев для вод рекреационного назначения. Сопоставление измеренных значений с установленными предельно допустимыми уровнями позволяло оценить соответствие качества воды санитарно-гигиеническим требованиям.

Аналитические данные лаборатории «Ион» (протоколы №14794 от 10.05.2024; №14795 от 15.11.2024; №14796 от 11.05.2025; №14798 от 10.11.2025) демонстрируют устойчивое смещение гидрохимического профиля исследуемого водоема в кислую сторону и систематические превышения по содержанию ряда элементов по сравнению с нормативами ГОСТ Р 51165-2016 и ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 (табл. 1).

Комплекс результатов указывает на активную миграцию растворимых форм железа, марганца и алюминия в кислой среде, что типично для вод, подвергающихся влиянию кислотного выщелачивания из вскрышных пород и терриконов. Кислая реакция повышает подвижность многих металлов и способствует их десорбции/растворению (Баторова, 2024).

Таблица 1. Сводка превышений нормативов в воде по данным протоколов за 2024–2025 гг.

Показатель	Норматив, мг/дм ³	05.2024	11.2024	05.2025	11.2025	Макс. превышение в ПДК
рН, ед.	6.0 – 9.0	3.6	3.5	3.5	3.2	Сильное закисление
Железо общее	0.3	0.93	1.08	1.22	5.90	19.7
Марганец	0.1	1.49	1.60	1.57	1.66	16.6
Алюминий	0.2	9.7	10.0	10.1	13.2	66.0
Никель	0.02	0.19	0.20	0.20	0.24	12.0
Литий	0.03	0.086	0.091	0.091	0.103	3.4
Кобальт	0.1	<0.001	<0.001	0.107	0.105	1.07
Свинец	0.01	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	< 0.3 (в норме)

Повышенные концентрации алюминия в водах может быть связано с наличием подстилающих горных пород, включая глину или антропогенных факторов (Мур, 1987).

Источниками железа и марганца служат как природные (подземные воды, сток), так и техногенные факторы. При увеличении рН и окислении они переходят в нерастворимые гидроксиды, что ухудшает органолептические свойства воды как цветность, мутность (Бабкина и др., 2013).

Никель, литий и свинец поступают в водоем из аналогичных источников: при выветривании пород, с поверхностным стоком и в результате промышленного воздействия. Кислая реакция среды (рН 3.2–3.6) является фактором, усиливающим мобилизацию и миграцию всех перечисленных металлов.

Нормативы использованы как ориентир (ПДК, мг/дм³). Приведенные кратности превышения рассчитаны по отношению концентрации к нормативному значению (рис. 2):

1. Алюминий (ПДК 0.2 мг/дм³): 2024 г. – значение 48,5–50 ПДК; 2025 г. – значение 50.5–66 ПДК.
2. Общее железо (ПДК 0.3 мг/дм³): 2024 г. значение 3.1–3.6 ПДК; 2025 г. – значение 4.1–19.7 ПДК.
3. Марганец (ПДК 0.1 мг/дм³): 2024 г. – значение 14.9–16.0 ПДК; 2025 г. – значение 15.7–16.6 ПДК.
4. Никель (ПДК 0.02 мг/дм³): 2024 г. – значение 9.5–10 ПДК; 2025 г. – значение 10–12 ПДК.
5. Литий (ПДК 0.03 мг/дм³): 2024 г. – значение 2.9–3.0 ПДК; 2025 г. – значение 3.0–3.4 ПДК.
6. Кобальт (ПДК 0.1 мг/дм³): 2024 г. – ниже предела обнаружения (<0.001 мг/дм³); 2025 г. – значение 1.05–1.07 ПДК.
7. Свинец (ПДК 0.01 мг/дм³): во всех пробах <0.003 мг/дм³ – ниже нормативного предела.

Делая вывод по результатам лабораторных анализов за 2 года в водах зафиксированы максимальные превышения концентраций по сравнению с нормативами, а именно: алюминия (50 ПДК), марганца (16 ПДК), никеля (10 ПДК), общего железа (4 ПДК), лития (3 ПДК). По результатам 2025 года выявлены следующие превышения: алюминия (66 ПДК), общего железа (20 ПДК), марганца (17 ПДК), никеля (12 ПДК), лития (3 ПДК), кобальта (1 ПДК).

Таким образом, пространственно-временная картина концентраций и химических условий позволяет выделить следующие ключевые положения:

1. Водная толща характеризуется стойкой кислой реакцией (рН 3.2–3.6), что является фактором, усиливающим выщелачивание и миграцию алюминия, железа, марганца и других металлов из твердой фазы в раствор.
2. Алюминий, марганец, железо и никель демонстрируют превышения ПДК в десятки раз; в 2025 г. наблюдается нарастание концентраций железа и алюминия.

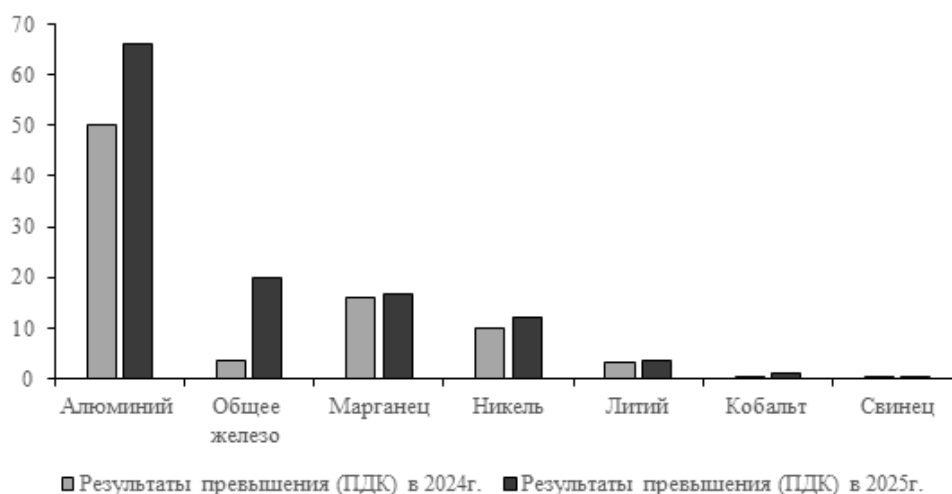


Рис. 2. Содержание химических элементов в пробах воды из Ушаковского карьера

3. Литий показывает устойчивое превышение ПДК примерно в 3 раза; кобальт – незначительное превышение в 2025 г.; свинец ниже предела обнаружения.

4. В пробах также зарегистрированы (в пределах аналитической отчетности) такие ионы и элементы, как: калий, магний, кальций, натрий, медь, мышьяк, кадмий, цинк, стронций, барий, бериллий, бор, ванадий, молибден, хром, титан, серебро, кремний, ртуть, селен и сурьма. Их концентрации не превышают утвержденных нормативов по данным протоколов.

Список литературы:

Бабкина С.С., Горюнова А.Г., Гатаулина А.Р., Улахович Н.А. Определение и прогнозирование содержания в природной воде ионов тяжелых металлов на примере меди, цинка, железа и марганца // Ученые записки Казанского университета. Естественные науки. 2013. Т. 155. №. 1. С. 87–94.

Баторова Г.Н. Содержание и распределение тяжелых металлов в системе вода–донные отложения–гидробионты / Г. Н. Баторова, И. Е. Елина // Innovations in Life Sciences : сборник материалов VI Международного симпозиума. Белгород, 22–24 мая 2024 года. С. 177–178.

Бочев А.В., Иванова Е.Ю. Российский опыт оценки экологического состояния природоохранных объектов (на примере природного заказника «Северный», СВАО г. Москвы) // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ "Нацразвитие" (Санкт-Петербург, Октябрь 2022). Международная научная конференция "Science. Research. Practice (Наука. Исследования. Практика)". – СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2022. С.18–21.

Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Формирование химического состава вод озер в условиях изменений окружающей среды. М.: Наука, 2010. 268 с.

Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 286 с.

УДК 004.9

КОРРЕКТИРОВКА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПО УРОВНЮ ВОДЫ ОЗЕР И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОПУСКОВ В РЯДАХ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ)

Вуглинский В.С., Сушкова В.А.

ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (23-я линия В.О., 2, Санкт-Петербург, Россия, 199053), priem@ggi.nw.ru

Аннотация. В статье представлена методика корректировки спутниковых измерений уровня воды крупных озер, основанная на использовании данных наземных наблюдений. Рассматриваются многолетние ряды среднемесячных значения уровней воды. Методика апробирована на примере озера Иссык-Куль. Показана возможность использования откорректированных спутниковых данных для восстановления пропусков в рядах наземных наблюдений.

Ключевые слова: озеро Иссык-Куль, уровень воды, спутниковые данные, корректировка, наземные наблюдения, восстановление пропусков.

Данные наземных наблюдений за уровнем воды крупных озер часто имеют пропуски, которые могут быть заполнены при наличии соответствующих спутниковых данных. Основы методики корректировки спутниковых измерений уровней воды крупных озер были заложены трудами ученых французской лаборатории LEGOS (Cretaux et al., 2011). В последующем, методика получила свое развитие в совместных трудах вышеуказанной лаборатории и Государственного гидрологического института (Вуглинский и др. 2022, 2024; Vuglinsky et al., 2023).

В настоящей статье рассматривается методика корректировки спутниковых данных по уровню воды озера Иссык-Куль, примененная в целях восстановления пропусков в ряду наземных наблюдений. В качестве расчетного интервала рассматривается месяц. Спутниковые наблюдения по озеру Иссык-Куль имелись за период с сентября 1992 г. по сентябрь 2020 г. В период с 1993 по 2001 гг. имели место пропуски данных для 11 месяцев, когда спутниковые измерения отсутствовали. Для заполнения пропусков был применен метод линейной интерполяции,

Количество спутниковых измерений в месяц в различные годы рассматриваемого периода сильно варьировало (табл. 1). Существенный рост числа измерений в период с 06.2016 г. был связан с увеличением числа спутников, выполняющих наблюдения за уровнем воды озер.

Таблица 1. Число спутниковых наблюдений за уровнем воды в течение месяца в разные временные периоды (оз. Иссык-Куль).

Периоды с разным количеством спутниковых наблюдений в течение месяца		
Одно наблюдение	Преимущественно 3 наблюдения	От 6 до 9 наблюдений и более
с 09.1992 по 07.2008 г.	с 08.2008 по 05.2016 г.	с 06.2016 по 09.2020 г.

После заполнения пропусков в спутниковом ряду, для дальнейшего анализа и корректировки был выделен участок ряда, соответствующий периоду, для которого имелись данные наземных наблюдений – с 09.1992 по 12.2017 гг. Указанный многолетний спутниковый ряд среднемесячных значений уровней воды был подвергнут статистическому анализу с целью выявления и удаления ошибочных и сомнительных значений. Для этого был применен способ выбраковки величин, выходящих за пределы полуторного размаха интерквартильного интервала между первым и третьим квартилями (Ricko et al., 2012). Все значения, лежащие за пределами этого интервала, превышают допустимую статистическую

ошибку разброса членов ряда, рассматриваются как случайные «выбросы» и подлежат удалению из ряда. В табл. 2 приведены полученные статистические характеристики многолетнего спутникового ряда среднемесячных значений уровня воды оз. Иссык-Куль.

Таблица 2. Статистические характеристики многолетнего спутникового ряда среднемесячных значений уровня воды оз. Иссык-Куль за период с 09.1992 г. по 12.2017 гг.

Вид многолетнего ряда	Статистические параметры				Квартили		
	σ	Среднее значение	Максим. значение	Миним. значение	25% (первый квартиль)	50% (медиана)	75% (третий квартиль)
Среднемесячные значения уровня (отм. в БС, м.)	0.29	1604.35	1604.82	1603.45	1604.14	1604.41	1604.58

На рис. 1 представлена так называемая «коробчатая диаграмма», построенная по данным о статистических характеристиках рассматриваемого спутникового ряда, которая иллюстрирует процедуру определения «выбросов».

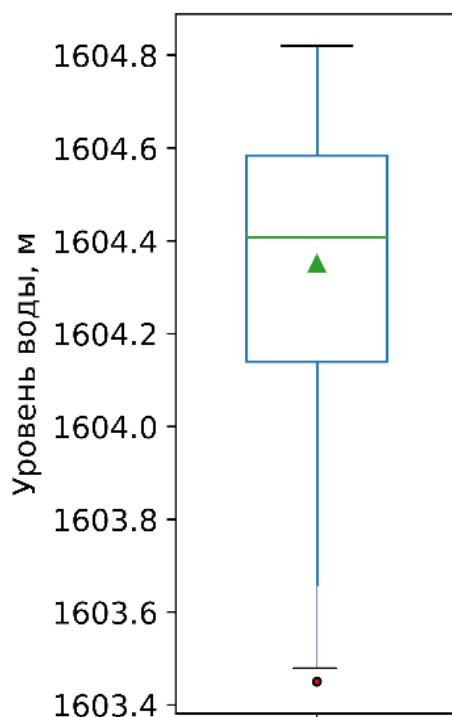


Рис. 1. «Коробчатая диаграмма», характеризующая процедуру определения «выбросов»

Верхние и нижние стороны «коробочки» характеризуют значения 75% и 25% квартилей (1604.58 и 1604.14 м), а горизонтальная линия внутри «коробочки» – медианное значение многолетнего ряда. Полуторный размах разницы между значениями 75% и 25% квартилей равен 0,66. Следовательно, допустимые пределы значений ряда равны: верхний – 1605.24 м, нижний – 1603.48 м. За указанными границами оказался только один член ряда со значением 1603.45 м (красная точка на диаграмме), который был удален из ряда, а образовавшийся пропуск заполнен методом линейной интерполяции между ближайшими членами ряда.

Далее, многолетний спутниковый ряд проверяется на его соответствие ряду наземных наблюдений. Вначале оценивается размах отклонений между спутниковыми и наземными данными путем построения и анализа совместных хронологических графиков. На рис. 2

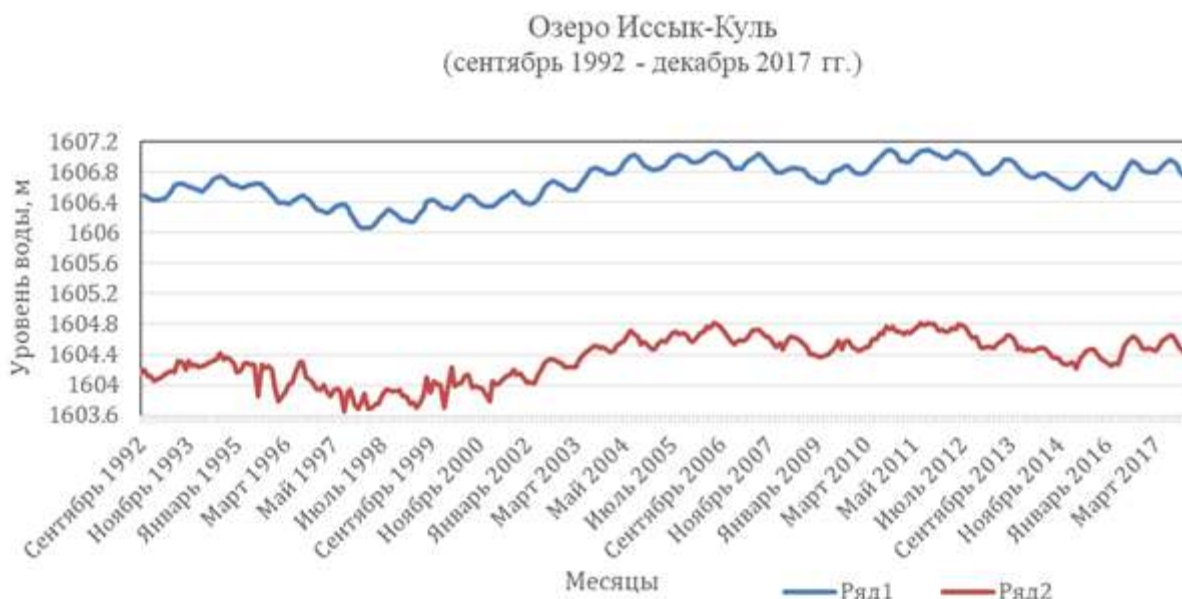


Рис. 2. Совмещенные хронологические графики изменений среднемесячных наземных и спутниковых значений уровней воды (ряд 1 – наземные данные, ряд 2 – спутниковые данные)

представлен такой график. Он показывает, что колебания уровней синхронны, но очевидно систематическое отклонение спутниковых данных по сравнению с наземными.

С целью исключения выявленной систематической погрешности в спутниковом ряду все его значения были скорректированы путем введения коэффициента, полученного как частное от деления средних значений наземного и спутникового рядов. Этот коэффициент оказался равным $K=1.00145$. После умножения всех членов спутникового ряда на указанный коэффициент, был получен «откорректированный» спутниковый ряд. На рис. 3 представлены совмещенные хронологические графики изменений наземных и откорректированных спутниковых значений уровней воды за совместный период наблюдений. Рисунок визуально свидетельствует о том, что корректировка прошла успешно, значения нового спутникового ряда близки значениям наземного ряда и колебания обеих рядов синхронны.



Рис. 3. Совмещенные хронологические графики изменений наземных и откорректированных спутниковых значений уровней воды (ряд 1 – наземные данные, ряд 2 – спутниковые данные)

Процедура оценки репрезентативности полученного откорректированного спутникового ряда основана на определении двух статистических параметров – среднеквадратического отклонения σ и коэффициента парной линейной корреляции r (Cretaux et al., 2006; Cretaux et al., 2018). Различия в величинах среднеквадратических отклонений для наземного и откорректированного спутникового рядов характеризуют разброс значений в рассматриваемых рядах. Коэффициент корреляции определяет тесноту статистической связи между наземным и откорректированным спутниковым рядами. При значениях коэффициента корреляции более 0.85 спутниковый ряд считается репрезентативным, поскольку в большинстве случаев, при таких его значениях, погрешности среднемесячных уровней воды спутникового ряда не превышают 10 см (Berry, 2005; Vaze et al., 2010). Применительно к рассматриваемым рядам, указанные статистические параметры составили: наземный ряд – $\sigma=0,26$, спутниковый ряд – $\sigma=0,29$; коэффициент корреляции – $r=0.97$. Таким образом, полученные близкие значения среднеквадратических отклонений и высокий коэффициент корреляции свидетельствуют о том, что откорректированный спутниковый ряд является репрезентативным и пригоден для дальнейшего использования.

Убедившись в том, что откорректированный спутниковый ряд является репрезентативным, полученный для него корректирующий коэффициент $K=1.00145$ был использован для продления ряда наземных наблюдений за уровнем воды оз. Иссык-Куль с января 2018 по сентябрь 2020 г. Для этого исходные спутниковые данные за указанный период были соответствующим образом откорректированы и, в итоге, был получен комбинированный ряд уровней воды оз. Иссык-Куль за период с 09.1992 по 09.2020 гг. На рис. 4 представлен хронологический график изменений среднемесячных уровней озера Иссык-Куль за указанный период, построенный по комбинированному ряду.

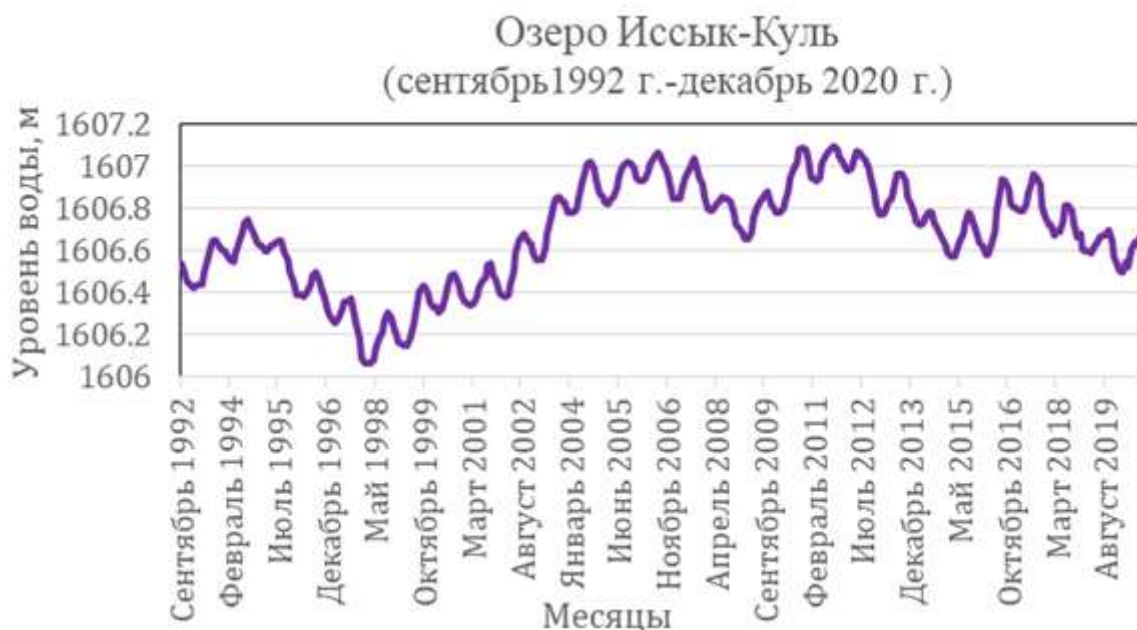


Рис. 4. Хронологический график изменений среднемесячных уровней озера Иссык-Куль, построенный по комбинированному ряду

Представленная методика позволяет повысить точность спутниковых данных по уровню воды крупных озер за счет их корректировки по результатам наземных наблюдений, а также использовать откорректированные спутниковые данные для заполнения пропусков в наземных рядах.

Список литературы:

- Вуглинский В.С., Крето Ж.-Ф., Измайлова А.В. и др. Методологии адаптации данных спутниковых измерений для оценки уровней воды крупных водохранилищ (на примере водохранилищ России) // Бюллетень науки и практики. 2022. №11. С. 128–141.
- Вуглинский В.С., Крето Ж.-Ф., Измайлова А.В. и др. Перспективы использования спутниковой информации для определения уровня воды крупных озер и водохранилищ (на примере водных объектов России) // Метеорология и гидрология. 2024. №1. С. 5–16. DOI:[10.3103/S1068373924010011](https://doi.org/10.3103/S1068373924010011).
- Berry P. A. M., Garlick J.D., Freeman J.A. and Mathers E.L. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32(16). P. 4. DOI:[10.1029/2005GL022814](https://doi.org/10.1029/2005GL022814).
- Crétaux J-F and C. Birkett. Lake studies from satellite altimetry // C. R. Geoscience. 2006. Vol. 338. P. 1098–1112. DOI:[10.1016/j.crte.2006.08.002](https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.08.002).
- Crétaux J.F., Calmant S., Abarca del Rio R. et al. Lakes studies from satellite altimetry // Coastal Altimetry / Eds. S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag. 2011. P. 509–534. DOI:[10.1007/978-3-642-12796-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0).
- Cretaux J., Berge-Nguyen M., Montazem A.S. et.al. Absolute Calibration or Validation of the Altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan) // Remote sensing. 2018. Vol. 10(11). P. 17. DOI:[10.3390/rs10111679](https://doi.org/10.3390/rs10111679).
- Ricko M., Birkett Ch.M., Carton J.A. and Cretaux J-F. Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry // Journal of Applied Remote Sensing. 2012. Vol. 6(1). P. 061710-1 – 061710-23. DOI:[10.1117/1.JRS.6.061710](https://doi.org/10.1117/1.JRS.6.061710).
- Vaze P., Neeck S., Bannoura W. et al. The Jason-3 Mission: Completing the transition of ocean altimetry from research to operations // Proceedings of the Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIV. Toulouse, France, 20–23 September 2010. Vol 7826. P. 78260Y. DOI:[10.1117/12.868543](https://doi.org/10.1117/12.868543).
- Vuglinsky V.S., Cretaux J-F., Izmailova A.V. et al. Comparison and correction of satellite measurements using in-situ observations of lake surface heights: A case study in lake Baikal // Advances in Space Research. May 2023. Vol. 71, Issue 10. P. 4030-4044. DOI:[10.1016/j.asr.2022.12.046](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.12.046).

УДК 556.16.072(282.247.13)

ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ РЕЧНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДХОДА

А. А. ФРИДМАНА И Л. В. КЕЛЛЕРА

Фролов А.В., Соломонова И.В.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

anatolyfrolov@yandex.ru

Аннотация. Применение подхода А.А.Фридмана–Л.В.Келлера (Ф–К-метод) к зависимостям между статистическими характеристиками выходного и входных процессов иллюстрируется на данных по водному балансу водосбора р. Оки. Этот метод позволяют решать обратную задачу – получать параметры моделей трудноизмеримых процессов – испарения по водосбору и эффективных влагозапасов на речном водосборе по данным о речном стоке.

Ключевые слова: динамико-стохастические модели, многолетний речной сток, подход Фридмана–Келлера

Введение. Для моделирования многолетних колебаний речного стока нами используется представление о водосборе как гидрологической системе с выходным процессом – речным стоком, и двумя входными процессами – осадками на водосбор и испарение с него. Соответствующая динамико-стохастическая модель (ДС-модель) многолетних колебаний речного стока позволяет устанавливать связи между статистическими характеристиками речного стока, с одной стороны, и соответствующими характеристиками осадков и испарения на водосборе – с другой (Кучмент, Гельфан, 1993). Поэтому ДС-модели речного стока могут быть использованы, например, для оценки климатически измененных осадков и испарения по водосбору на речной сток. Применение подхода А.А.Фридмана–Л.В.Келлера (Баренблатт, 1978) к зависимостям между статистическими характеристиками выходного и входных процессов позволяют решать обратную задачу – получать параметры моделей трудноизмеримых процессов – испарения по водосбору и эффективных влагозапасов на речном водосборе по данным о речном стоке (Фролов, Соломонова, 2016; Frolov, 2014, Kirchner, 2009).

Основные уравнения и соотношения. Предполагается, что многолетние колебания речного стока с водосбора формируются только двумя вынуждающими процессами – осадками r_t и испарением e_t на водосборе. В качестве моделей этих компонентов принимаются стационарные случайные авторегрессионные процессы первого порядка (AR(1)-процессы; Музылев и др., 1982),

$$p_t = r_p p_{t-1} + n_{p,t} \quad (1)$$

и

$$e_t = r_e e_{t-1} + n_{e,t} \quad (2)$$

где t – время (годы) r_p, r_e – числовые параметры (коэффициенты автокорреляции), $n_{p,t}, n_{e,t}$ – взаимно-коррелированные белые шумы с нулевыми средними и дисперсиями $\sigma_{n,e}^2 = \langle n_e^2 \rangle$ и $\sigma_{n,p}^2 = \langle n_p^2 \rangle$, угловые скобки здесь в дальнейшем означают операцию усреднения. В общем случае, белые шумы могут иметь негауссово распределение.

Уравнение водного баланса, описывающего многолетние колебания эффективного (т.е. участвующего в формировании речного стока) влагозапаса на водосборе w_t , имеет вид

$$w_t = w_{t-1} + p_t - e_t - q_t, \quad (3)$$

где q_t – речной сток с водосбора, все компоненты баланса в (3) имеют размерность слоя, мм/год. Для замыкания системы (1)–(3) принимается функциональная зависимость речного стока от эффективного влагозапаса на водосборе,

$$q_t = \alpha w_t, \quad (4)$$

где $\alpha > 0$ – параметр, показывающий изменение стока при изменении запасов воды на водосборе, участвующими в формировании речного стока, на единицу слоя. Для водосборов, речной сток с коэффициентами вариации из примерного диапазона 0.1...0.4, линейная аппроксимация (4) вполне допустима.

Из уравнений (3) и (4) следует уравнение, описывающее колебания речного стока с водосбора,

$$q_t = \beta q_{t-1} + \varphi (p_t - e_t) \quad (5)$$

где $\beta = 1/(1 + \alpha)$, $\varphi = \alpha/(1 + \alpha) = \alpha\beta$.

Уравнение (5) представляет собой обобщение модели (Klemeš, 1978) на случай моделирования многолетних колебаний осадков и испарения как взаимно коррелированных АР(1)-процессов.

Решение системы уравнений (1)–(2) и (5) позволяет получить аналитические выражения для статистических характеристик стока как функций статистических параметров осадков и испарения на водосборе и параметра α . В частности, коэффициент автокорреляции речного стока r_q равен

$$r_q = R_q^1 / \sigma_q^2, \quad (6)$$

где $R_q^1 = \lim_{t \rightarrow \infty} \langle q_t q_{t-1} \rangle$, дисперсия стока σ_q^2 равна

$$\sigma_q^2 = \frac{\alpha^2 \beta^2}{(1 - \beta^2)} \left\{ \frac{\sigma_p^2 (1 + \beta r_p)}{1 - \beta r_p} + \frac{\sigma_e^2 (1 + \beta r_e)}{1 - \beta r_e} - r_{pe} \sigma_p \sigma_e \left[\frac{1 + \beta r_p}{(1 - r_p^2)(1 - \beta r_p)} + \frac{1 + \beta r_e}{(1 - r_e^2)(1 - \beta r_e)} \right] \right\}, \quad (7)$$

где σ_p^2 и σ_e^2 – дисперсии испарения и осадков, соответственно; r_e – коэффициент автокорреляции испарения, r_{pe} – коэффициент взаимной корреляции между испарением и осадками, остальные величины определены выше.

Коэффициент взаимной корреляции между стоком с водосбора и осадками r_{qp} дается выражением

$$r_{qp} = \alpha \beta (\sigma_p - r_{pe} \sigma_e) / \sigma_q \quad (8)$$

Применение подхода А.А.Фридмана и Л.В.Келлера для оценки статистических характеристик испарения с водосбора при отсутствии репрезентативных данных наблюдений. Система (6)–(8) связывает вторые моменты речного стока и остальных компонентов водного баланса водосбора. Если бы изначально были известны статистические характеристики осадков и испарения, их взаимная корреляция, параметр α из (4), то моделирование многолетних колебаний речного стока было бы тривиальной задачей. В реальности же, ситуация другая – хотя бы из-за отсутствия необходимых данных об испарении и, как следствие, о взаимной корреляции между испарением и осадками. Неизвестна также величина параметра α . Суть подхода Ф–К–метода заключается в получении тем или иным способом систему уравнений, связывающих статистические моменты любого порядка между входными и выходными процессами моделируемой системы. Решение указанной системы уравнений позволяет найти неизвестные характеристики процессов.

Систему (6)–(8) запишем в более удобном для восприятия, общем виде,

$$\begin{cases} R_q^1(\alpha, \sigma_p^2, \sigma_e^2, r_p, r_e, r_{pe}) / \sigma_q^2 = \rho_q \\ \sigma_q^2(\alpha, \sigma_p^2, \sigma_e^2, r_p, r_e, r_{pe}) = \sigma_q^2, \\ r_{qp}(\alpha, \sigma_p^2, \sigma_e^2, r_p, r_e, r_{pe}) = r_{qp} \end{cases}, \quad (9)$$

где σ_p^2, σ_e^2 – дисперсии осадков и речного стока, соответственно, r_p, r_q – коэффициенты автокорреляции осадков и речного стока оцениваются по данным наблюдений.

Коэффициент взаимной корреляции r_{pe} между осадками и испарением, строго говоря, неизвестен, поэтому приходится воспользоваться его полуэмпирической оценкой, $r_{pe} \approx 0.4$. Коэффициент r_{pe} представляет собой зональную характеристику. Величины α, σ_e^2 и r_e ,

получаемые как решения системы (11), должны удовлетворять естественным ограничениям, например, должны выполняться неравенства α , $\sigma_e^2 > 0$ и $|r_e| < 1$.

Применение теории к моделированию многолетних колебаний стока р.Оки. Для проведения расчетов использовались статистические параметры речного стока и осадков на водосборы, взятые из различных литературных источников (Батталов, 1968; Добровольский, 2017; Исмаилов, Муращенкова, 2019; Пространственно-временные..., 1988; Раткович, 1970). В результате решения системы (9) применительно к статистическим характеристикам водного баланса водосбора р. Оки, были получены статистические характеристики многолетних колебаний испарения и параметра α (табл. 1).

Таблица 1. Статистические характеристики компонентов водного баланса и параметр α для водосбора р. Оки (полужирным курсивом выделены параметры, полученные решением системы (9))

Компоненты водного баланса водосбора р. Оки		Характеристики				
		Среднее, мм/год	Дисперсия, (мм/год) ²	Коэф. вариации	Параметр авторегрессии, r_e	Параметр α , год ⁻¹
сток		164	1300	0.22	–	1.43
осадки		640	4096	–0.10	–0.2	
испарение		476	1929	0.10	–0.2	
Корреляционная матрица компонентов водного баланса водосбора р. Оки (на диагонали коэффициенты автокорреляции)						
		1	2	3		
1	сток	0.23	0.70	–0.28		
2	осадки		–0.20	0.40		
3	испарение			–0.20		

На основании полученной модели многолетних колебаний стока р. Оки на рис. 1 приведена зависимость дисперсии стока от дисперсий осадков и испарения на водосборе (в предположении постоянства параметра α).

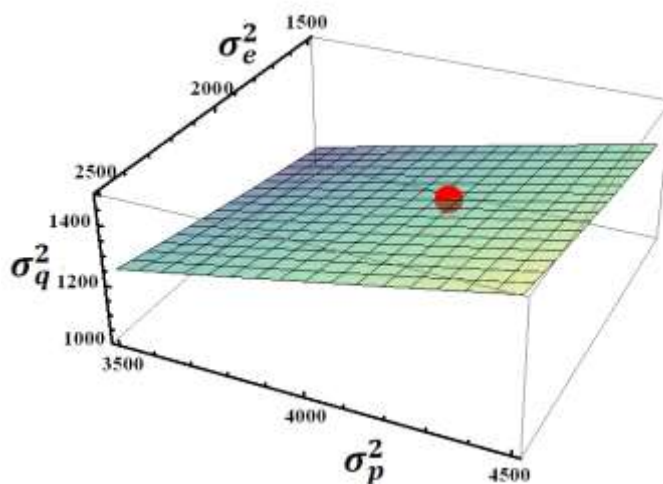


Рис. 1. Зависимость дисперсии стока р. Оки σ_q^2 от дисперсий осадков σ_p^2 и испарения σ_e^2 на водосборе. Красный шарик показывает современное соотношение между σ_q^2 , σ_p^2 и σ_e^2 .

Размерности дисперсий (мм/год)²

Отметим, что средняя величина объема эффективного влагозапаса на водосборе реки Оки, вычисленная по соответствующей ДС-модели, равна 28.5 куб. км.

Вывод. Применение подхода Фридмана–Келлера позволило получить все параметры эффективного испарения с водосбора р. Оки и параметра α , тем самым, построить динамико-стохастическую модель многолетних колебаний стока р. Оки. Аппроксимация линейной функцией зависимости между речным стоком и эффективным влагозапасом на водосборе дает возможность также моделировать многолетние изменения этого влагозапаса.

Алгоритм, использующий подход Фридмана–Келлера, может быть применен для построения динамико-стохастических моделей многолетних колебаний речного стока для решения различных прикладных гидрологических задач, например, для оценки влияния климатических изменений параметров осадков и испарения на сток с водосбора.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы № FMWZ-2025-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы:

- Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 207 с.
- Батталов Ф.З. Многолетние колебания атмосферных осадков и вычисление норм осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 183 с.
- Добровольский С.Г. Глобальная гидрология. Процессы и прогнозы. М.: ГЕОС, 2017. 525 с.
- Исмайлов Г.Х., Федоров В.М. Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна р. Волги // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. №3. С. 259–276.
- Пространственно-временные колебания стока рек СССР. Под ред. А. В. Рождественского. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 375 с.
- Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М.: Наука, 1993. 104 с.
- Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука. 1982. 184 с.
- Раткович Д.Я. Закономерности чередования маловодных и многоводных лет как основа расчетов регулирования речного стока // Тр. ГГИ. Вып. 180. Л.: Гидрометеиздат, 1970. С. 179–293.
- Фролов А.В., Соломонова И.В. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний стока р. Северной Двины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 54–70. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-54-70.
- Frolov A.V. Estimation of the Statistical Characteristics of Long-Term Fluctuations in Evaporation from Large River Catchments // Doklady Akademii Nauk. 2014. V. 458. No. 3. P. 345–348.
- Kirchner J.W. Catchments as simple dynamical systems: catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward // Water resources research. 2009. V. 45. P. w02429. doi:10.1029/2008wr006912.
- Klemeš V. Physically based stochastic hydrologic analysis // Advances in Hydrosience. 1978. V. 11. P. 285–356.

УДК 556.16

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОПУСКОВ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ НА ПОСТАХ РФ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GloFAS-ERA5

Цыпленков А.С.¹, Абрамов Д.В.¹, Морейдо В.М.²

¹ МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация, atsyplenkov@geogr.msu.ru

² Институт Водных Проблем РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Глобальные гидрологические модели, основанные на данных метеорологического реанализа, позволяют восстанавливать ряды расходов воды для неизученных и слабоизученных рек. Наиболее перспективные результаты, согласно литературным оценкам, демонстрирует реанализ стока воды GloFAS-ERA5. Он охватывает период с 1 января 1979 года с ежедневным временным шагом. Несмотря на удовлетворительные показатели валидации (глобальный модифицированный коэффициент Клинга-Гупты (KGE') 0.7), независимые региональные оценки обычно показывают более низкие метрики. Это особенно заметно для рек со сложными условиями формирования и трансформации стока. Смоделированные величины стока воды нуждаются в коррекции систематических ошибок, свойственных продуктам спутниковых реанализов. В рамках данного исследования выполнена коррекция среднесуточных расходов воды, оцененных моделью GloFAS-ERA5 v4.0, для более чем 2200 гидрологических постов РФ. На основе открытых данных из АИС-ГМБО, Arctic-Net и Global Runoff Data Centre выполнена коррекция смоделированных значений методом квантилей (от англ. *quantile mapping*). На всех доступных постах восстановлены расходы воды за период с 1979 года по настоящее время. Набор откорректированных данных может служить удобным инструментом для предварительной гидрологической оценки.

Ключевые слова: речной сток; восстановление пропусков; GloFAS-ERA5; статистическая коррекция; гидрологический реанализ

Систематические наблюдения за речным стоком являются основой для решения широкого круга задач в области водного хозяйства, гидрологического прогнозирования и оценки водных ресурсов. Вместе с тем сеть гидрологических постов Российской Федерации за последние три десятилетия существенно сократилась. По сравнению с концом 1980-х годов количество действующих постов с измерениями расходов воды уменьшилось более чем на 60% в отдельных регионах (Магрицкий, 2022). В Арктической зоне России в настоящее время только около 15% территории покрыты гидрометрическими наблюдениями. Особенно остро эта проблема стоит для северо-востока страны. В бассейнах Чукотского и Восточно-Сибирского морей восточнее реки Колымы наблюдения за расходами воды практически отсутствуют с середины 1990-х годов.

Помимо сокращения сети наблюдений значительная часть существующих рядов расходов воды содержит пропуски различной продолжительности. Восполнение пропусков в рядах наблюдений представляет собой актуальную задачу, решение которой необходимо для корректного расчета водного баланса, оценки многолетних трендов стока и калибровки гидрологических моделей.

Глобальные гидрологические модели, основанные на данных метеорологического реанализа, открывают возможности для восстановления рядов расходов воды как для неизученных рек, так и для постов с пропусками в наблюдениях. Среди современных продуктов реанализа стока наиболее перспективные результаты демонстрирует GloFAS-ERA5 (Harrigan et al., 2020). Это оперативный глобальный реанализ речного стока, разработанный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) совместно с Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии. Данный продукт охватывает период с 1 января 1979 года по настоящее время с ежедневным временным шагом и пространственным разрешением 0.05° (около 5 км). Данные реанализа GloFAS-ERA5 версии

4.0 представляют собой среднесуточные значения расходов воды. Они рассчитаны путем сопряжения поверхностного и подземного стока из модели земной поверхности HTESSEL с гидрологической моделью маршрутизации стока LISFLOOD. Согласно официальной документации, медианный модифицированный коэффициент эффективности Клинга–Гупты при глобальной калибровке модели составляет 0.7.

Вместе с тем непосредственное использование «сырых» данных реанализа сопряжено со значительными погрешностями. Независимые региональные оценки обычно показывают более низкие показатели качества по сравнению с глобальными калибровочными метриками, особенно для рек со сложными условиями формирования и трансформации стока. Смоделированные величины стока воды нуждаются в коррекции систематических ошибок, что делает необходимым применение методов статистической постобработки.

В данном исследовании мы применили ряд методов коррекции реанализа GloFAS-ERA5 для гидрометрических постов РФ. В качестве источников натуральных данных о среднесуточных расходах воды использованы три базы данных: Автоматизированная Информационная Система Государственного Мониторинга Водных Объектов (АИС-ГМВО), база данных Arctic-Net и Глобальный центр данных о стоке воды (GRDC). В совокупности эти источники предоставили информацию по 2270 гидрологическим постам на территории Российской Федерации за период с 1979 по 2023 гг.

Для корректного сопоставления данных наблюдений с ячейками расчетной сетки реанализа выполнена процедура пространственной привязки гидрологических постов. Сопоставление осуществлялось на основе сравнения площадей водосборов. Для каждого поста определялась ячейка сетки GloFAS-ERA5, площадь водосбора которой наиболее близка к паспортной площади водосбора поста. Результаты привязки ранжировались по качеству. При расхождении площадей менее 10% присваивался наивысший класс точности, при расхождении более 50% пост исключался из дальнейшего анализа как ненадежный и его положение в пространстве корректировалось вручную.

Для устранения систематических смещений между модельными и натурными данными применены методы семейства квантильного отображения (от англ. *quantile mapping*, см. Cannon et al., 2015). Суть данного подхода состоит в преобразовании функции распределения модельных значений к функции распределения наблюдаемых значений. В рамках исследования апробированы восемь методов коррекции. Методы, основанные на квантилях, это классическое квантильное отображение (*quantile mapping*), эмпирическое квантильное отображение (*empirical quantile mapping*), квантильное отображение с сохранением тренда (*quantile delta mapping*) и квантильное отображение с удалением тренда (*detrended quantile mapping*). Методы, основанные на масштабировании, включают линейное масштабирование (*linear scaling*), масштабирование дисперсии (*variance scaling*) и метод дельта-изменений (*delta method*). Также использован метод масштабированного распределения (*scaled distribution mapping*) для экстремальных значений. Выбор оптимального числа квантилей и метода коррекции осуществлялся с помощью кросс-валидации с исключением по одному году. Это позволяет максимально эффективно использовать ограниченные ряды наблюдений, характерные для многих постов.

Предварительный анализ качества «сырого» реанализа GloFAS-ERA5 для территории Российской Федерации выявил умеренную прогностическую способность модели (рис. 1). Медианные значения критериев качества составили: коэффициент Нэша–Сатклиффа – 0.48; модифицированный коэффициент Клинга–Гупты – 0.49; коэффициент корреляции – 0.78. При этом логарифмический коэффициент Нэша–Сатклиффа, характеризующий качество моделирования в период межени, показал отрицательное медианное значение (–0.71), что свидетельствует о систематическом занижении меженных расходов воды глобальной моделью. Пространственное распределение метрик качества неоднородно, с наилучшими результатами на крупных равнинных реках ЕТР и Западной Сибири. В то же время, качество моделирования существенно ниже для малых водотоков, горных рек и рек криолитозоны. Из 2270 проанализированных постов удовлетворительное и хорошее качество ($NSE > 0.5$)

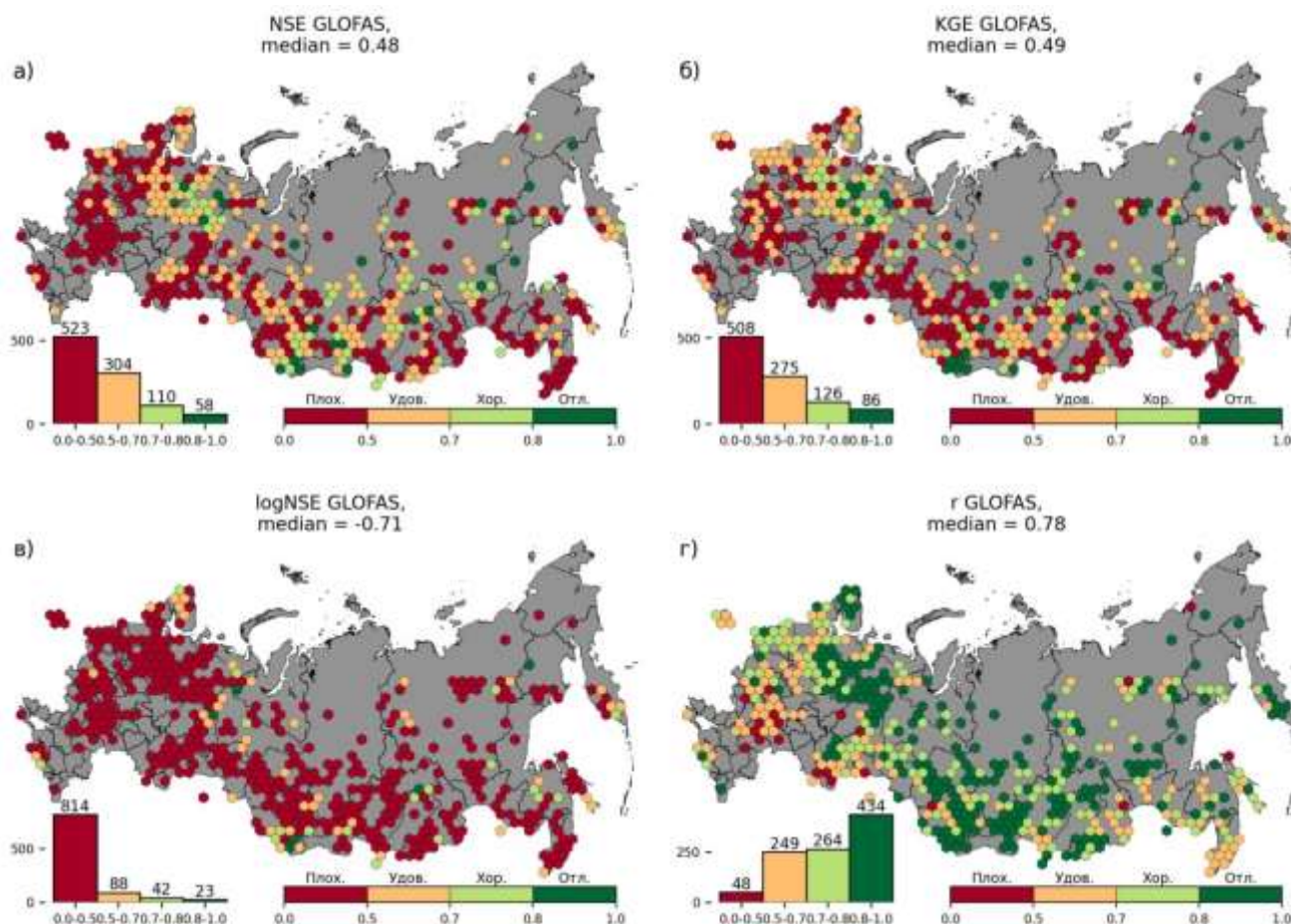


Рис. 1. Пространственное распределение критериев качества реанализа GloFAS-ERA5 v4.0 по территории Российской Федерации: а) коэффициент Нэша–Сатклиффа; б) модифицированный коэффициент Клинга–Гупты; в) логарифмический коэффициент Нэша–Сатклиффа; г) коэффициент корреляции. Гистограммы показывают распределение постов по градациям качества в соответствии с Moriasi et al. (2015)

отмечено лишь для 1077 постов (47%). Это подчеркивает необходимость коррекции модельных данных.

Детальная апробация методологии коррекции выполнена на примере бассейна реки Анадырь. Это крупнейшая речная система Дальнего Востока России стационарные наблюдения за расходами воды, на которой отсутствуют с 1996 г. По семи гидрологическим постам бассейна, имевшим наблюдения в период 1979–1996 гг., проведена калибровка и кросс-валидация алгоритмов коррекции. Коррекция методом квантилей (DQM) привела к улучшению медианного KGE' на 17% (с 0.64 до 0.75 в среднем по бассейну). Примечательно, что для поста Анадырь–Снежное, использовавшегося при глобальной калибровке модели GloFAS, оптимальным оказалось линейное масштабирование (один квантиль). Для некалибровочных постов требовалась более сложная нелинейная коррекция.

С предварительными результатами коррекции можно ознакомиться на веб ресурсе <https://glofas.sediment.ru>, где представлены восстановленные ряды среднесуточных расходов воды на гидрологических постах РФ с площадью водосбора более 1000 км².

Таким образом, на основе открытых данных гидрологических наблюдений из АИС-ГМВО, Arctic-Net и GRDC выполнена коррекция среднесуточных расходов воды. Эти расходы были оценены глобальной моделью GloFAS-ERA5 версии 4.0 для более чем 2200 гидрологических постов Российской Федерации. Апробация восьми методов статистической

коррекции показала, что методы семейства квантильного отображения существенно повышают качество модельных оценок. Это особенно заметно для постов, не использовавшихся при глобальной калибровке GloFAS-ERA5. Полученный набор откорректированных данных позволяет восстановить непрерывные ряды среднесуточных расходов воды за период с 1979 г. по настоящее время. Он может служить инструментом для предварительной гидрологической оценки в условиях отсутствия или недостаточности натурных наблюдений.

Результаты получены при финансовой поддержке проекта Правительства Российской Федерации, реализуемого в рамках Соглашения №075-15-2025-008 от 27.02.2025 г.

Список литературы:

Магрицкий Д.В. Новые данные о распределении нормы стока воды на Северо-Востоке России и притоке речных вод в арктические моря // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 70–85.

Cannon A.J., Sobie S.R., Murdock T.Q. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? // Journal of Climate. 2015. Vol. 28. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping. No. 17. P. 6938–6959.

Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F., Barnard C., Cloke H., Pappenberger F. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present // Earth System Science Data. 2020. Vol. 12. No. 3. P. 2043–2060. DOI:10.5194/essd-12-2043-2020.

Moriasi D.N., Gitau M.W., Pai N., Daggupati P. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria // Transactions of the ASABE. 2015. Vol. 58. Hydrologic and Water Quality Models. No. 6. P. 1763–1785.

УДК 556.55:004.92

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО ЗАТОПЛЕНИЯ БЕРЕГОВ ОЗЕРА ХАНКА НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Катрасов С.В., Шамов В.В., Бугаец А.Н.

ФГБУН «Тихоокеанский институт географии» ДВО РАН, Владивосток, Россия,
vlshamov@yandex.ru

Аннотация. По данным дистанционного зондирования Земли Landsat с помощью пакета QGIS определены участки современного затопления поймы оз. Ханка и новая протока, соединяющая оз. Ханка и р. Сунгача. Средствами программного комплекса Delft3D Flow для 4-летнего расчетного периода было получено пространственное распределение полей скоростей течений и уровня воды озера с учетом гидрометеорологических условий.

Ключевые слова: озеро Ханка, протока, гидродинамика, моделирование, Delft3D Flow

Движение водных масс в крупных водоемах является сильным, а часто и решающим фактором функционирования и состояния озерных экосистем (Трофимчук, 2025; Wu et al., 2024). Вместе с тем, гидродинамика водоема является результатом наложения многих разномасштабных процессов и, как следствие, сложным предметом исследований. Трансграничное озеро Ханка (Дальний Восток РФ) не является исключением, а разделение его акватории государственной границей осложняет организацию комплексных наблюдений за его режимом. В связи с этим метод математического моделирования представляется весьма эффективным инструментом исследования динамики водных масс озера, учитывая сильную изменчивость метеорологических условий, динамику притока воды в озеро, приливных сил.

В последние десятилетия отмечается устойчивая тенденция повышения уровня воды (УВ) в оз. Ханка с затоплением прилегающих к озеру территорий и размывом берегов (Болгов, 2016; Бортин, Горчаков, 2016; Махинов, 2020). Это повышение обусловлено различными, в том числе и климатическими факторами (Пономарев и др., 2016; Водный..., 2022). Для оценки влияния гидрометеорологических факторов на процессы в озере с акцентом на район истока р. Сунгача авторами использованы гидродинамические поля, рассчитанные с помощью программного комплекса Delft3D Flow (Deltares, 2013) за период с 01.01.2018 по 31.12.2021 гг. Полученные данные обработаны и проанализированы в системе QGIS (Longley et al., 2015). Для оценки площади затопления в северо-восточной части поймы оз. Ханка проведена обработка ДДЗ Landsat-8 с помощью комбинирования 4-го, 5-го и 3-го каналов, с получением геопривязанных данных контрастного отображения участков вода/суша в формате GeoTIFF и последующей обработкой средствами ГИС. В результате применения соответствующих процедур были получены следующие значения площадей затопления поймы в районе истока р. Сунгача: в 2018 г. – 43.12 км², в 2019 г. – 100.90 км², в 2020 г. – 143.08 км², в 2021 г. – 67.70 км², что соответствует динамике УВ в озере на гидрологическом посту (гп) Астраханка (рис. 1). В расчетах учитывались предполагаемые сбросы/заборы воды из оз. Малая Ханка, КНР (Xiao et al., 2023), полученные в результате сценарного моделирования хода уровня воды озера. Коэффициент детерминации между измеренными и рассчитанными УВ оз. Ханка составляет 0.93. Метеорологические условия были заданы по данным реанализа ERA-5. Для построения ЦМР ложа озера использована навигационная карта. Для процедуры моделирования построена прямолинейная расчетная сетка 460×398 ячеек с горизонтальным разрешением 200 м, вертикальным – пять σ -слоев, внешние границы которых установлены на 15% глубины от поверхности воды и от дна озера. Скорость и направление ветра, изменение атмосферного давления заданы с дискретностью 1 час, остальные параметры – с суточным разрешением.

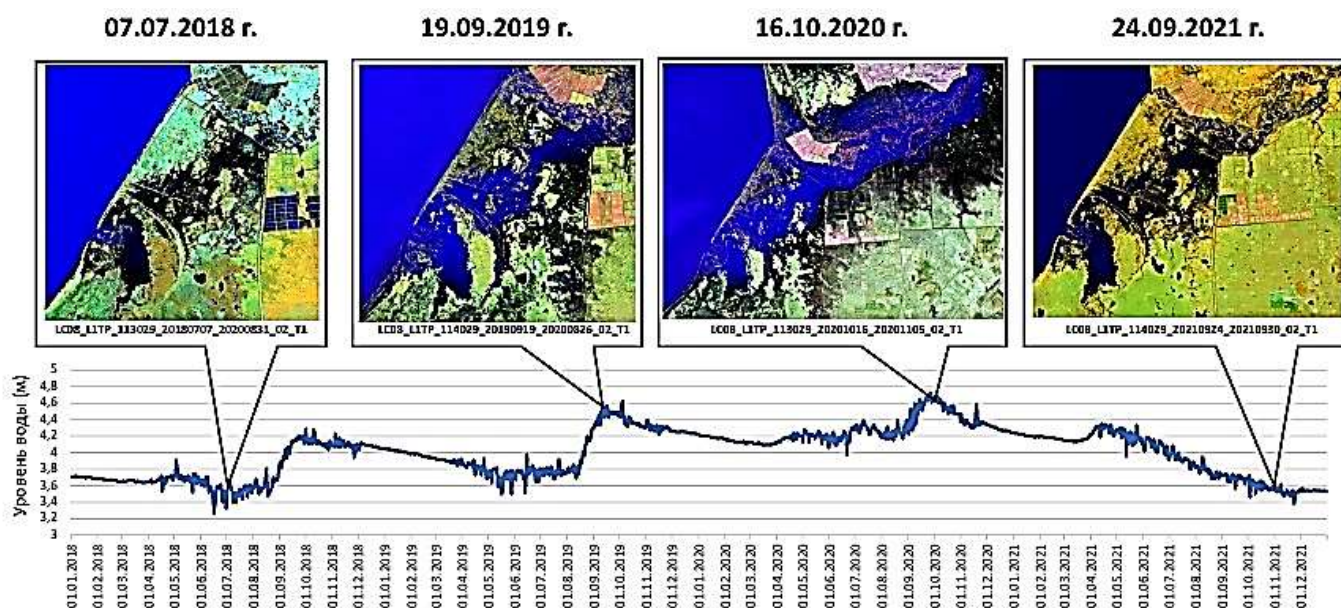


Рис. 1. Межгодовая динамика уровня воды (м) оз. Ханка на гп Астраханка в 2018–2021 гг., сопоставленная с ДДЗ Landsat-8 (гидрологический композит RGB: каналы SWIR1, NIR, Red)

В результате моделирования на основе данных метеорологических и гидрологических наблюдений для расчетного периода получено пространственное распределение полей скоростей течений и УВ оз. Ханка с учетом атмосферных осадков и стока крупных притоков – рр. Комиссаровка, Мельгуновка, Илистая и Спасовка. Рассчитано и подтверждено спутниковыми снимками образование «южной» широкой протоки, соединяющей озеро и район истока р. Сунгача и обеспечивающей устойчивый водообмен между ними (рис. 2), что кардинально меняет прежний (примерно до 2010 года) режим р. Сунгача, усиливает эрозионно-аккумулятивные процессы в северо-восточной части оз. Ханка и в целом приводит к преобразованию экосистем водно-болотных угодий на части низкой поймы озера.

Пример расчета поля скоростей течений на 6:00 15.09.2019 г. приведен на рис. 3.

Понимание описанных процессов необходимо для комплексной геоэкологической оценки изменения гидрологического режима, а также для обоснования решений по обеспечению устойчивого управления природными ресурсами в бассейне оз. Ханка.

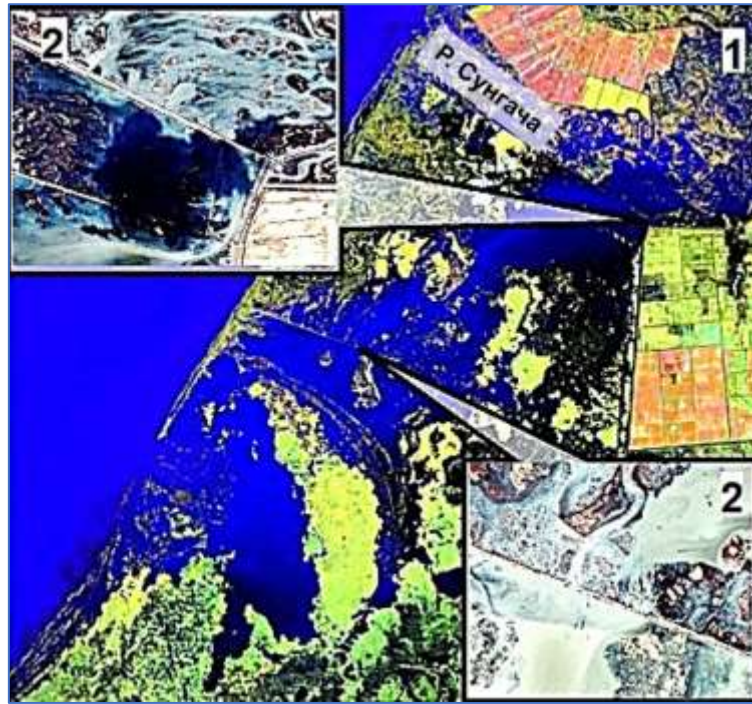


Рис. 2. Вновь образовавшаяся протока южнее истока р. Сунгача: (1) черный цвет – подтопленные участки, синий цвет – открытая вода, (2) разрушенные защитные дамбы

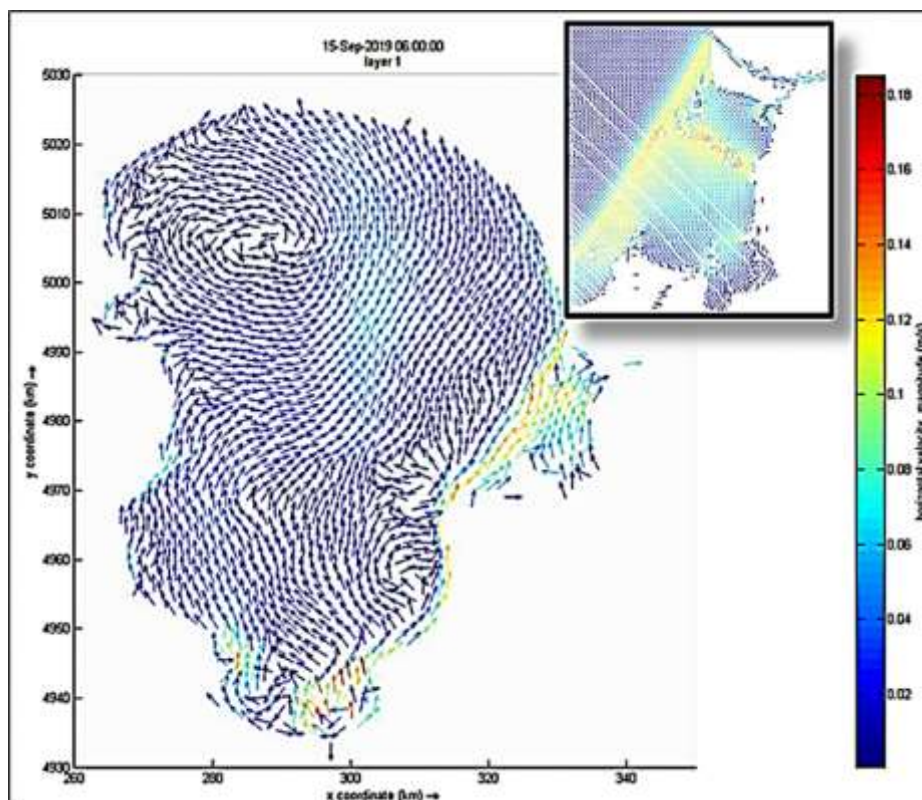


Рис. 3. Пример расчета поля горизонтальных скоростей движения воды (м/с) в оз. Ханка (слой 3-σ, 06.00 15.09.2019 г.). На врезке: поле скоростей в районе истока р. Сунгача

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-47-00022).

Список литературы:

- Болгов М.В. Экстремальные уровни озера Ханка: природные вариации или антропогенное воздействие? // Вестник ОНЗ РАН. 2016. Т. 8. NZ1001. 14 с.
- Бортин Н.Н., Горчаков А.М. Причины экстремально высокого уровня воды трансграничного озера Ханка // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 62–84.
- Водный баланс озера Ханка и его изменения под влиянием природных и антропогенных факторов / Под ред. В. Ю. Георгиевского. СПб: Государственный гидрологический институт, 2022. 272 с.
- Махинов А.Н. Озеро Ханка: подъем уровня воды, его масштабы и последствия // Природа. 2020. № 11 (1263). С. 37–45.
- Пономарев В.И., Дмитриева Е.В., Шкорба С.П., Карнаухов А.А. Аномалии в районе озера Ханка, на Дальнем Востоке и в Сибири, как следствие изменения климатического режима в АТР на рубеже 20–21 веков // Трансграничное озеро Ханка: причины повышения уровня воды и экологические угрозы. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 41–52.
- Трофимчук М.М. Циклические процессы в водных экосистемах // Метеорология и гидрология. 2025. № 1. С. 5–13.
- Deltares, 2013. Delft3D Flow. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. 2013. User Manual. Hydro-Morphodynamics. Version 3.15.30932. Delft – Netherlands.
- Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. Geographic Information Science and Systems. 2015. John Wiley & Sons. 560 p.
- Wu Y., Chen D., Liu Y., Li F., Wang P., Wang R., Shamov V.V., Zhu A.-X., Deng C. Water quality changes in the Xingkai (Khanka) Lake, Northeast China, driven by climate change and human activities: insights from published data (1990–2020) // Water. 2024. Vol. 16. P. 3080. DOI:10.3390/w16213080
- Xiao F., Wang X., Fu C. Impacts of land use/land cover and climate change on hydrological cycle in the Xiaoxingkai Lake Basin // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2023. No. 47. P. 101422. DOI:10.1016/j.ejrh.2023.101422

УДК 556.5

АЛЬТИМЕТРИЯ РЕК И ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДА ПО ДАННЫМ SWOT

Чепикова С.С.

Государственный гидрологический институт, *chepikova.s@hydrology.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются возможности использования данных спутниковой альтиметрии миссии SWOT (Surface Water and Ocean Topography) для мониторинга уровней воды рек и озер бассейна реки Невы. Анализ основан на сопоставлении спутниковых оценок уровней воды с данными наземных гидрологических наблюдений за период 2023–2025 гг. Рассматриваются особенности применения нового спутникового продукта SWOT для оценки уровня режима внутренних водоемов региона.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, SWOT, уровни воды, бассейн реки Невы

Спутниковая альтиметрия изначально разрабатывалась для мониторинга высоты поверхности Мирового океана и сопутствующих гидрометеорологических параметров, прежде всего в условиях открытого океана (Barrick, 1985; Campbell, 2023). В последнее время повышается интерес использования радиоальтиметрических измерений для мониторинга поверхности суши (Лебедев, 2005; Троицкая, 2012). Мониторинг уровней воды внутренних водоемов является важной задачей гидрологических исследований, особенно для регионов с развитой речной и озерной сетью. В последние годы спутниковая альтиметрия все активнее используется для оценки уровня режима рек и озер, однако традиционные альтиметрические миссии имели ограничения, связанные с пространственным разрешением. Запуск в конце 2022 года миссии SWOT (Surface Water and Ocean Topography)¹³ открыл новые возможности для мониторинга поверхностных вод за счет применения интерферометрического радара Ка-диапазона, обеспечивающего более детальное пространственное покрытие внутренних водоемов (до 70 метров).

В настоящей работе выполнено сопоставление спутниковых оценок уровней воды, полученных по данным миссии SWOT, с наземными гидрологическими наблюдениями для водных объектов Северо-Запада России. Анализ проведен для крупных озер региона (Ильмень, Онежское, Ладожское, Водлозеро), а также для рек бассейна Невы. В качестве исходных спутниковых данных использовались продукты уровня Level 2 миссии SWOT за период 2023–2025 гг. Наземные данные по уровням воды получены из адаптивной системы гидрологического мониторинга «Центр сбора и обработки данных» (АСГМ ЦСОД)¹⁴ и материалов ФГБУ «СЗУГМС».

Сопоставление спутниковых и наземных наблюдений выполнялось для дат, в которые имелись совпадающие по времени измерения уровней воды. В качестве эталонного ряда использовались данные наземных гидрологических постов. Разности уровней воды рассчитывались как разность значений наземных наблюдений и спутниковых оценок SWOT. Для количественной оценки различий использовались стандартные статистические показатели: средняя ошибка, медиана, средняя абсолютная ошибка и среднеквадратическая ошибка.

Расположение исследуемых озер, рек и гидрологических постов бассейна реки Невы представлено на рис. 1.

¹³ Surface Water Ocean Topography (SWOT). 2025. SWOT Level 2 Lake Single-Pass Vector Data Product, Version D. Ver. D. PO.DAAC, CA, USA. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.5067/SWOT-LAKESP-D> (дата обращения: 23.12.2025).

¹⁴ Центр Сбора и Обработки Данных (АСГМ ЦСОД). [Электронный ресурс]. URL: <http://asgm.mecom.ru/> (дата обращения: 23.12.2025).

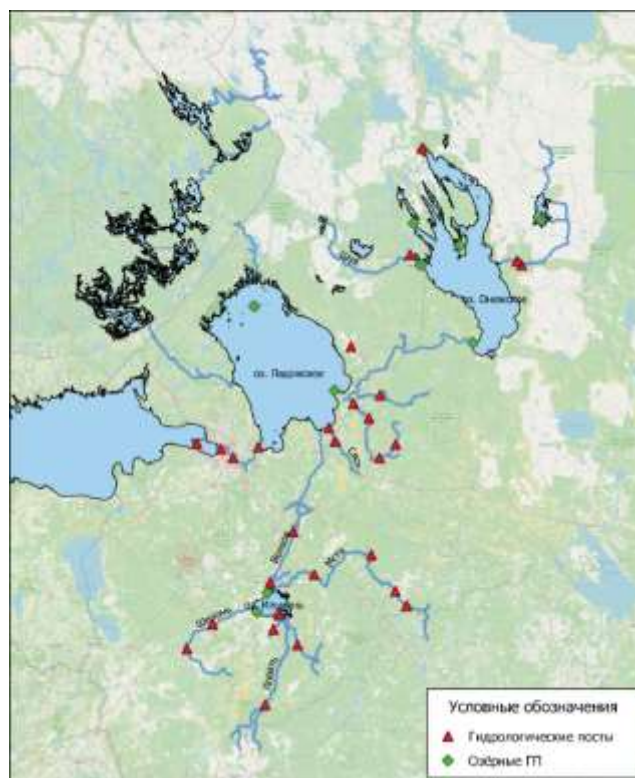


Рис. 1. Карта расположения основных водных объектов бассейна реки Невы и гидрологических постов, для которых производился анализ

Сводные статистические характеристики, полученные по результатам сопоставления спутниковых и наземных данных для озер и рек, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики, полученные по результатам сопоставления данных спутниковой миссии SWOT и наземных гидрологических наблюдений для рек и озер Северо-Запада России за период 2023–2025 гг.

Водный объект	Количество наблюдений	Средняя ошибка, м	Средняя абсолютная ошибка, м	СКО, м	Медиана
оз. Ильмень (2)*	71	–0.115	0.162	0.610	–0.02
оз. Онежское (3)	283	–0.112	0.704	2.518	–0.07
оз. Ладожское (2)	109	0.001	0.239	0.851	–0.08
оз. Водлозеро (1)	36	–0.050	0.126	0.233	–0.07
р. Паша (4)	222	–1.99	2.14	3.78	–0.77
р. Нева (3)	173	–1.81	2.07	3.69	–0.62
р. Мста (4)	167	–0.82	1.83	3.89	–0.46
р. Водла (2)	136	–0.18	0.37	0.95	–0.12
р. Волхов (2)	122	–0.38	0.53	1.78	–0.11
р. Сясь (2)	82	0.09	0.53	1.44	–0.17
р. Ловать	67	0.01	1.55	2.12	0.69
р. Оять	67	0.43	0.80	0.93	0.71
р. Полисть	64	–1.17	1.22	2.20	–0.41
р. Пола	60	0.27	0.88	1.21	0.68
р. Шелонь	37	1.59	3.18	5.01	2.74

* В скобках указано количество гидрологических постов на водном объекте

Анализ полученных статистических характеристик показывает, что величины разностей уровней воды между спутниковыми и наземными наблюдениями для рассмотренных водных объектов варьируются от сантиметровых до метровых значений. Для большинства озер характерны относительно небольшие значения средней и средней абсолютной ошибки (средняя ошибка по всем озерам –10 см), тогда как для более крупных и гидрологически сложных водоемов и речных участков отмечается увеличение разброса разностей уровней воды и значений среднеквадратической ошибки. Отрицательные значения средней ошибки, выявленные для ряда объектов, указывают на тенденцию к завышению спутниковых оценок уровней воды относительно наземных наблюдений.

Следует отметить, что на текущем этапе объем доступных спутниковых наблюдений миссии SWOT остается ограниченным, что не позволяет сделать окончательные выводы о стабильности и точности оценок уровней воды для всех рассмотренных водных объектов. Полученные результаты носят предварительный характер и указывают на необходимость дальнейшего накопления и анализа данных за более продолжительный временной интервал. Тем не менее выполненное сопоставление демонстрирует перспективность использования данных миссии SWOT для мониторинга уровня режима рек и озер Северо-Запада России.

Список литературы:

Лебедев С. А., Костяной А. Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // М.: Изд. центр «МОРЕ» Международного ин-та океана, 2005.

Троицкая Ю. И. Рыбушкина Г.В., Соустова И.А. и др. Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39. №. 2. С. 169–185.

Barrick D. E., Lipa B. J. Analysis and interpretation of altimeter sea echo // Advances in geophysics. 1985. Vol. 27. P. 61–100.

Campbell J. B., Wynne R. H. Introduction to remote sensing: Sixth Edition. – Guilford press, 2023.

УДК: 551.4:571.6

ПОСТРОЕНИЕ СРЕДНЕМНОГОЛЕТНИХ РАСХОДОВ ВОДЫ РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ РЕЧНОЙ СЕТИ

Толкачева В.Ф.¹, Гарцман Б.И.¹, Энтин А.Л.^{1,2}

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, vasilisa.tolkachevag@yandex.ru

²Московский государственный университет, Москва, Россия.

Аннотация. На Черноморском побережье Кавказа выявлена взаимосвязь максимального среднего вреза бассейна, рассчитанного на основе цифровой модели рельефа, со среднемноголетним модулем стока воды с этого же бассейна, измеренным на гидрологических постах. Выявленная взаимосвязь позволяет моделировать среднемноголетние расходы воды в каждом сегменте речной сети, выделенной по ЦМР методами структурно-гидрографического анализа. Выявленная зависимость может быть применена для получения данных о стоке на гидрологически неизученных бассейнах, что особенно актуально в горных регионах.

Ключевые слова: Черноморское побережье Кавказа, речные сети, структурно-гидрографический анализ, цифровая модель рельефа, геоморфометрия.

На этапе развития структурно-гидрографического анализа, предшествовавшем внедрению цифровых моделей рельефа (ЦМР), методологическая база исследований формировалась преимущественно на основе интерпретации топографических картографических материалов и анализа опубликованных литературных источников. На современном этапе наблюдается активное развитие специализированного инструментария для обработки и анализа пространственных данных. Исследователями предпринимаются попытки комплексного учета всей совокупности морфологических элементов речных систем, а также выявления закономерностей, функциональных зависимостей и пространственно-временных трендов в структурной организации и морфометрических параметрах гидрографической сети в их взаимосвязи с морфометрическими характеристиками водосборных бассейнов. В настоящей статье представлены отдельные результаты указанных исследований.

Исследование выполнено на примере 13 бассейнов рек российского сегмента Черноморского побережья Кавказа (перечисление с северо-запада на юго-восток): Гастогай, Дюрсо, Адерба, Вулан, Таупсе, Аше, Псезуапсе, Шахе, Дагомыс, Сочи, Мацеста, Хоста, Мзымта (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения исследуемых речных систем

Данные по средним измеренным расходам воды на гидрологических постах взяты из базы данных (Golosov, V., Tsyplenkov, A., 2021).

Моделирование проводилось на основе ЦМР FABDEM (Hawker et al., 2022). Были построены модели речных сетей с помощью инструмента Stream Network Orders из набора

ArcPyStreamScape, реализующий единый алгоритм определения истоков водотоков и построения речной сети по ЦМР на основе подбора порогового значения функции инициации, с возможностью выбора из нескольких форм этой функции (Gartsman, Entin, Shekman, 2024). Для возможности сравнения результатов, за «истину» были приняты речные сети с топографических карт масштаба 1:100000, отмеченные «голубыми линиями». Более подробно методика построения моделей речных сетей описана в (Гарцман и др., 2008, Гарцман, Галанин, 2011, Гарцман, 2013, Толкачева и др., 2024, 2025).

В исследовании выполнено сравнение значений расходов и модулей стока со всеми характеристиками бассейна, которые удалось рассчитать на основе ЦМР: площади бассейнов, уклоны водосборов, уклоны речной сети, длины водотоков фактические и модельные, минимальная, средняя и максимальные высоты бассейнов. Модули стока воды показали логарифмическую зависимость от максимального вреза бассейна с коэффициентом детерминации 0.87 (рис. 2).

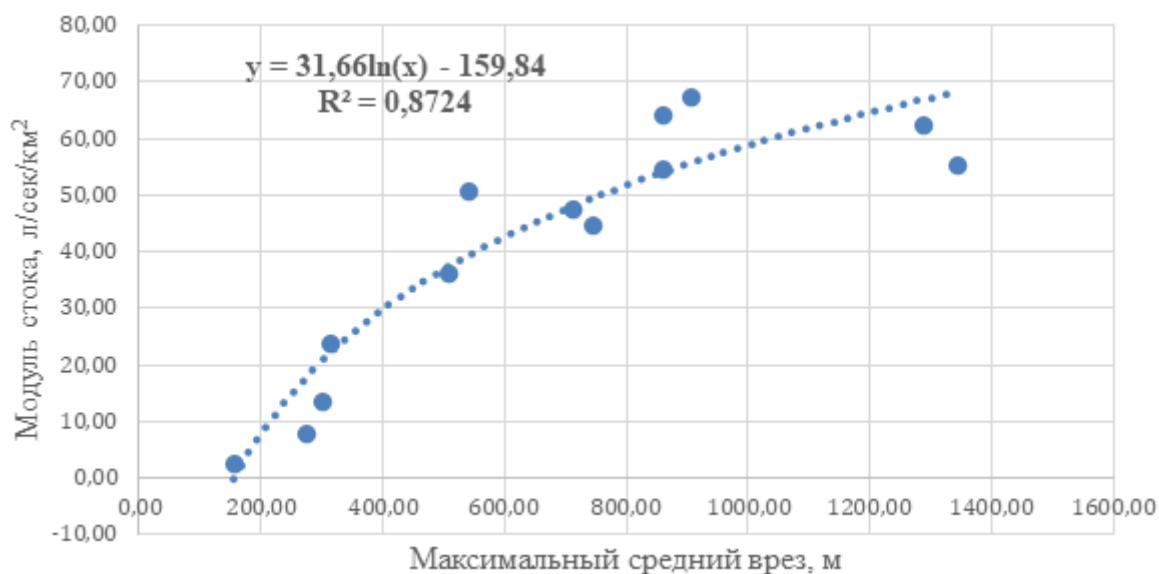


Рис. 2. Логарифмическая зависимость модуля стока воды от величины максимального среднего вреза бассейна реки

Максимальный средний врез в бассейне определяется как максимальное значение разности средней высоты водоразделов и средней высоты тальвегов для вышележащего водосбора по каждому пикселю.

Для воспроизведения расходов воды воспользуемся обратной формулой модуля стока воды для расчета расхода воды:

$$Q = M \times A,$$

где M – модуль стока воды, Q – расход воды, A – площадь бассейна.

По обратной формуле нам необходимо умножить модуль стока на площадь бассейна. Модули стока для каждого сегмента речной сети определяются по зависимости, представленной на рис. 2. Таким образом, с помощью калькулятора в таблице атрибутов слоя речной сети можно перемножить площади водосборов каждого сегмента на модуль стока этих же сегментов и разделить на тысячу, и мы получим значения расхода воды в метрах кубических в секунду в замыкающем пикселе каждого водотока речной сети.

Для рек Туапсе и Аше показан конечный результат моделирования среднесуточных расходов воды для каждого сегмента речной сети с помощью модели речной сети (рис. 3).

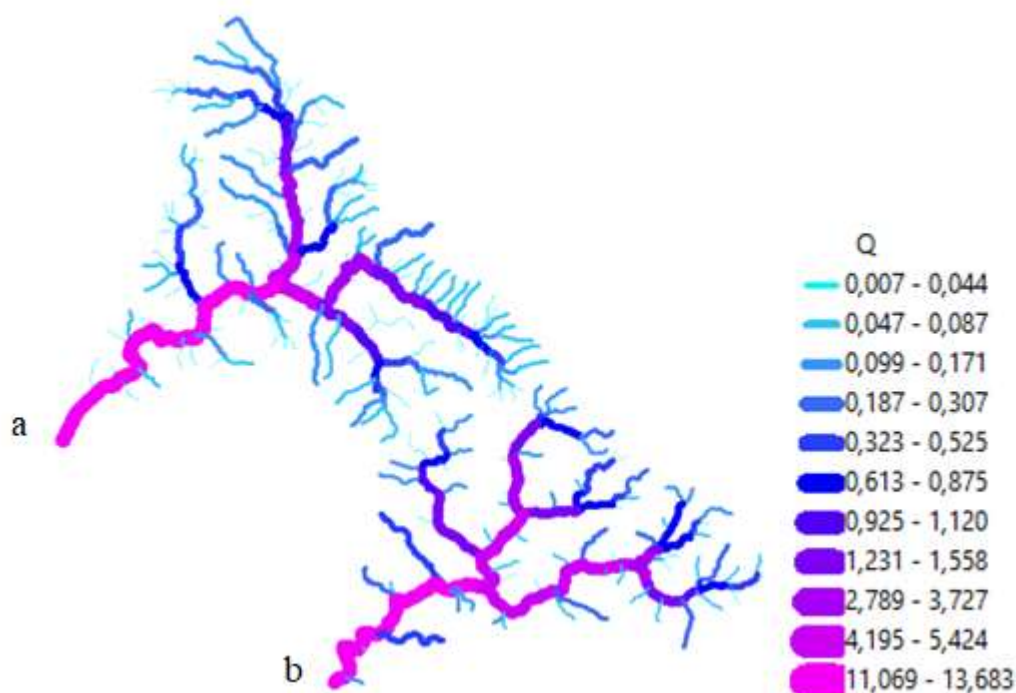


Рис. 3. Реки Туапсе (а) и Аше (б) с модельными построениями расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) для каждого сегмента речной сети

Следующим этапом работы станет применение данной зависимости для построения среднееголетних расходов воды для моделей речных сетей гидрологически неизученных бассейнов Черноморского побережья Кавказа.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы:

- Гарцман Б.И., Бугаец А.Н., Тегай Н.Д., Краснопеев С.М. Анализ структуры речных систем и перспективы моделирования гидрологических процессов // География и природ. ресурсы. 2008. № 2. С. 116–123.
- Гарцман Б.И., Галанин А.А. Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 27–37.
- Гарцман Б.И. Анализ геоморфологических условий формирования первичных водотоков на основе цифровых моделей рельефа // География и природ. ресурсы. 2013. № 1. С. 136–147.
- Толкачева В. Ф., Гарцман Б. И., Энтин А. Л. Моделирование речной сети на основе цифровой модели рельефа: проблема «коротких» притоков // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. № 2. С. 110–124. DOI: 10.34753/HS.2024.6.2.110.
- Толкачева В. Ф., Гарцман Б. И., Энтин А. Л. Моделирование речной сети на основе двухпараметрической модели и регионального обобщения параметров (на примере черноморского побережья Кавказа) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. № 2. С. 166–180. DOI: 10.34753/HS.2025.7.2.166
- Gartsman B.I., Entin A.L., Shekman E.A. Special tools for structural and hydrographic analysis of river systems in the ArcMap environment // Water Resources. 2024. Vol. 51. Is. 3. P. 171–184. DOI: 10.1134/S0097807824700726

Goloso V., Tsyplenkov A. Factors Controlling Contemporary Suspended Sediment Yield in the Caucasus Region // Water. 2021. Vol. 13. P. 3173. DOI:10.3390/w13223173

Laurence Hawker et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environ. Res. Lett. 2022. Vol. 17. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f

УДК 504.454 (282.247.29)

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОБРАТНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА УСТЬЕВОМ УЧАСТКЕ РЕКИ ПРЕГОЛИ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Двоеглазова Н.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия, *nadya2eyes@mail.ru*

Аннотация.

В работе представлены результаты первичной обработки данных вертикальной структуры скорости течений в середине устьевого участка реки Преголи (г. Калининград) осенью 2017 г. На основе натурных данных идентифицировано вертикальное распределение течений при естественном речном стоке и в условиях проникновения солоноватых вод вверх по течению. Установлена связь вертикального распределения направления и скорости течений, и вариаций гидрометеорологических условий, что важно для прогнозирования динамики вод и переноса примесей в устьевых областях. Оценена возможная дальность транспорта взвешенных частиц вверх по реке.

Ключевые слова: река Преголи, эстуарий, устьевая зона смешения, штормовые нагоны, соленостная интрузия, обратное течение, Калининградская область.

Введение. Для устьевого участка р. Преголи характерно сезонное проникновение солоноватых вод из Калининградского залива в результате подъема уровня воды на устьевом взморье и в т.ч. воздействия ветровых нагонов (Чубаренко, Шкуренок, 2001; Chubarenko et al., 2017). Инструментальные гидрологические наблюдения в устьевом участке р. Преголи, ранее проводившиеся в осенне-зимний сезон, позволили по данным вертикального распределения значений солености констатировать (Двоеглазова, Чубаренко, 2024; Боскачёв, Чубаренко, 2025) формирование двух типов структур в результате действия динамического (нагонно-адвективного) (Демиденко, Лупачев, 2011) и градиентного (интрузионно-адвективного) (Чубаренко, Шкуренок, 2001) механизмов. Данных, позволяющих описать характеристики потока (скорость и направление) на устьевом участке р. Преголи, в исследованиях до 2017 г. получено не было.

Целью настоящей работы является инструментальное подтверждение возникновения обратных течений на устьевом участке р. Преголи в результате действия динамического и градиентного механизмов. В связи с отсутствием современных измерений были использованы архивные данные 2017 года.

Методы. В работе представлены первичные результаты обработки инструментальных измерений скорости и направления течений в контрольной точке (Чубаренко и др., 2024) в середине устьевого участка р. Преголи для осени 2017 г. Оценка размерности взмучивающихся и переносимых частиц проведена по данным скорости течений на основе диаграммы Хюлстрема (Hjulström, 1939). Скорость ветра определялась по данным (Расписание Погоды, 2026).

Результаты и обсуждение. По данным регулярных вертикальных зондирований в середине устьевого участка реки осенью 2017 года наиболее часто наблюдались положительные течения, т.е. вниз по реке по всей глубине (например, рис. 1а, 2а). Случаи обратного течения (вверх по реке) были зафиксированы реже (например, рис. 1б, 2б). Вертикальное распределение направления течений в таких случаях указывало либо на полностью однонаправленный по всей глубине поток вверх по реке (рис. 1б), либо на наличие слоя придонного противотечения (рис. 2б). В обоих случаях предшествующие гидрологические условия были схожи и характеризовались наличием стока реки с однородной вертикальной структурой и скоростями 0.2-0.3 см/сек от поверхности до дна (рис. 1а, 2а).

Однородный поток, направленный вверх по реке (рис. 1б), был сформирован под воздействием ветровых нагонов западных румбов (рис. 1в), а также в результате подъема

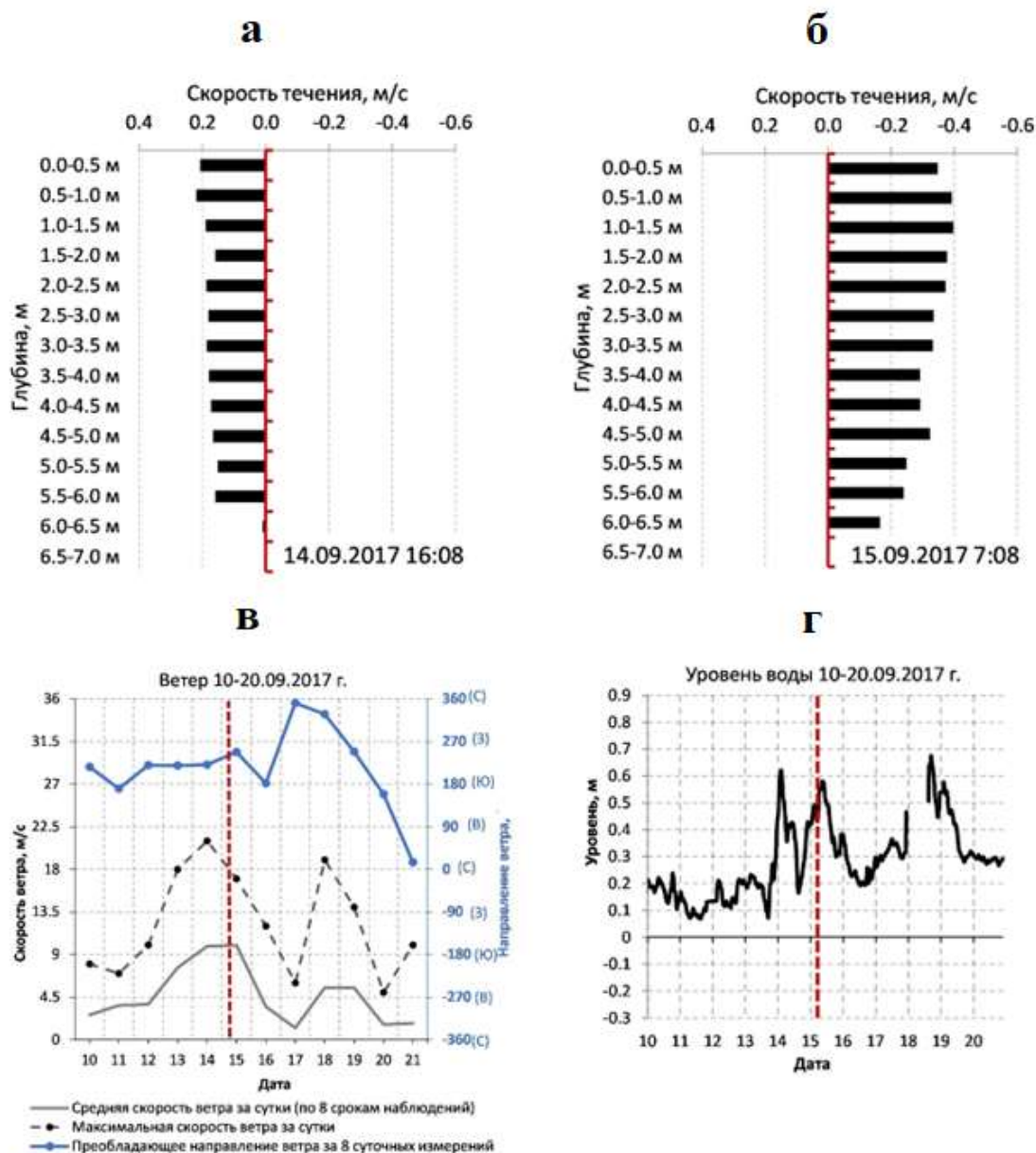


Рис. 1. Эпюры скорости течения в р. Преголе в условиях естественного стока реки 14.09.2017 г. (а) и обратного течения 15.09.2017 г. в результате действия нагонно-адвективного механизма (б). На диаграммах скорости ветра (в) и уровня воды (г) красной пунктирной вертикальной линией обозначен срок фиксации обратных течений

уровня воды (рис. 1г), что соответствует действию динамического (нагонно-адвективного) механизма проникновения солоноватых вод.

Формирование придонного слоя противотечения, направленного вверх по реке (рис. 2б), произошло при активном сгонном восточном ветре (рис. 2в) и монотонном спаде уровня воды (рис. 2г). Достаточно активный (скорость до 0,3 м/с) придонный интрузионный противозаток, движущийся вверх по течению реки, наиболее вероятно является результатом одновременного проявления элемента эстуарной циркуляции (когда при усилении поверхностного течения при плотностной стратификации (Двоеглазова, Чубаренко, 2024) нижележащие более тяжелые слои движутся навстречу поверхностному течению) и реакции системы на кратковременный подъем уровня воды (до 10 см за считанные часы), который

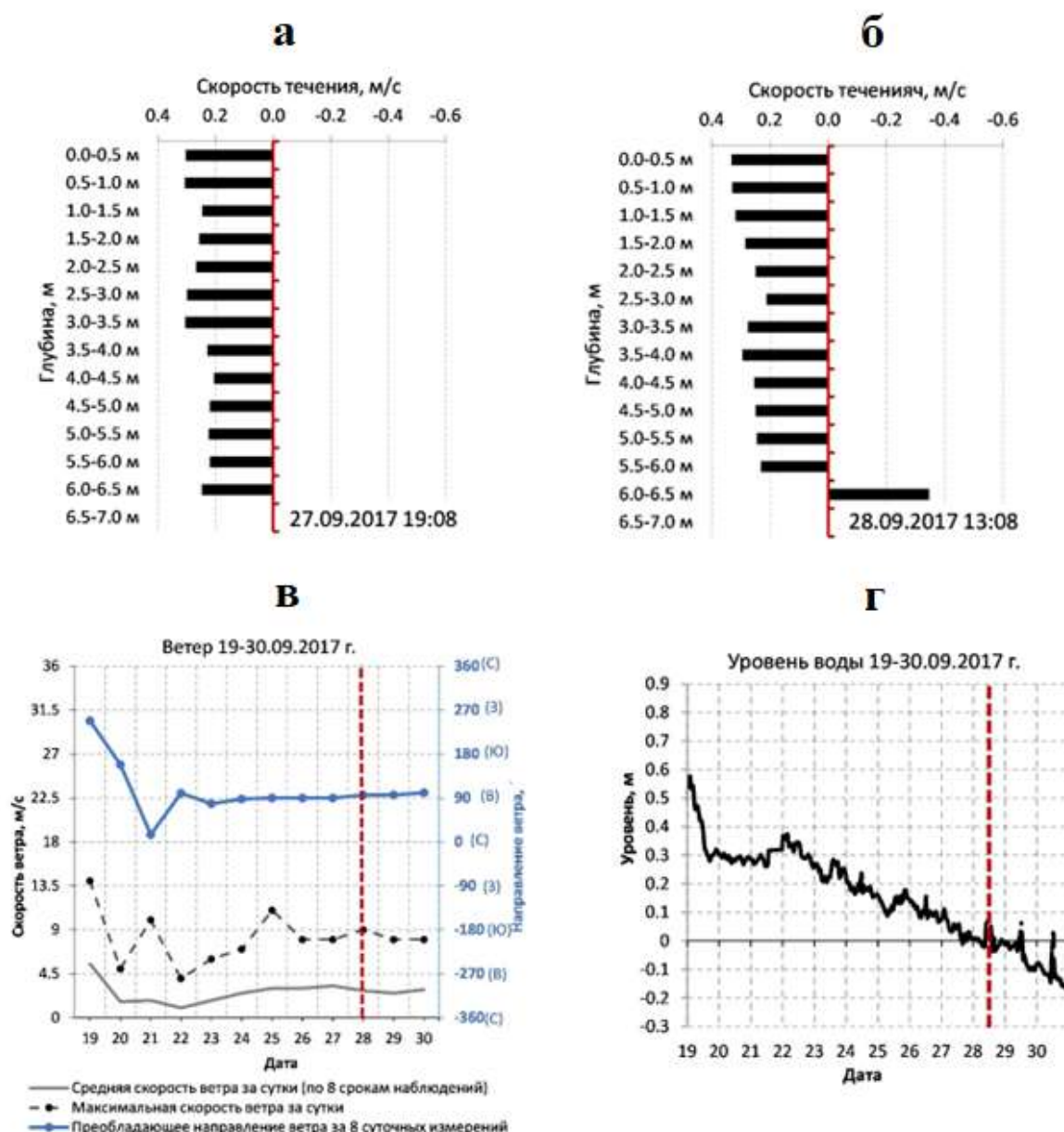


Рис. 2. Эпюры скорости течения в р. Преголе в условиях естественного стока реки 27.09.2017 г. (а) и обратного течения 28.09.2017 г. в результате действия нагонно-адвективного механизма (б). На диаграммах скорости ветра (в) и уровня воды (г) красной пунктирной вертикальной линией обозначен срок фиксации обратных течений

усилил придонное противотечение, затормозив в глубинных слоях основное течение. Этот интрузивный противозаток не был результатом действия динамического (нагонно-адвективного) механизма проникновения солоноватых вод (Чубаренко, Шкуренок, 2001, Боскачёв, Чубаренко, 2025), хотя и мог бы быть начальным этапом его развития в случае дальнейшего повышения уровня воды.

Скорости обратных течений в придонном горизонте 6-7 м составляли в среднем 0,15 м/с, но в отдельные моменты могли достигать 0,55-0,63 м/с (28.09.2017). За период измерения не было зафиксировано продолжительного существования обратного потока, наибольшая длительность составила сутки (14-15.09.2017). Существовавшие в этот срок метеоусловия могли способствовать и более длительному поддержанию обратного течения вплоть до одной

недели. Дальность проникновения обратного потока вверх по реке на основе полученных данных о скорости течений могла достигать в среднем 13 км за сутки.

Согласно диаграмме Хюлстрема при средней скорости течения 0,15 м/с может осуществляться перемещение вверх по реке частиц размером до 3,5 мм. При максимальной скорости 0,63 м/с частицы от 0,01 мм до 3 мм взмучиваются, а частицы менее 0,01 и от 3 до 50 мм – могут перемещаться потоком, не оседая.

Выводы. На основе инструментальных данных о скорости и направлении течения установлены и количественно охарактеризованы случаи формирования обратного движения воды вверх по реке. Динамический (нагонно-адвективный) механизм возникает под действием западных ветров (в среднем до 9 м/с) и быстром подъеме уровня воды (на 45 см за 12 часов), что приводит к развитию обратного потока во всей водной толще. Случай возникновения противотечения только в придонном слое при интенсивном естественном речном стоке и сгонном восточном ветре иллюстрирует возможность развития типичной эстуарной циркуляции (подъем вверх по руслу солоноватых вод в придонном слое) при кратковременном интенсивном подъеме уровня (10 см за 3-4 часа) даже на фоне общего падения уровня. Обратные течения могут взмучивать и перемещать частицы в размерном диапазоне микропластика до 13 км вверх по реке.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю, Чубаренко Б.В. за советы по анализу данных. Анализ результатов и подготовка выступления на конференции выполнены в рамках гранта Российского научного фонда № 24-44-20027.

Список литературы:

Боскачёв Р.В., Чубаренко Б.В. Придонные интрузии солоноватой воды из Калининградского залива в рукав Нижняя Преголя // Водные ресурсы. 2025. Т. 52. № 1. С. 18–35. 10.31857/S0321059625010097.

Двоглазова Н.В., Чубаренко Б.В. Изменения в структуре гидрологических характеристик устьевой зоны смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) в период осеннего осолонения // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 87–104. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-87-104.

Демиденко Н.А., Лупачев Ю.В. «Исследование проникновения морских соленых вод в устья рек Онега, Северная Двина, Мезень и Печора» // Научно-технический отчет. М.: ФГБУ «ГОИН». – 2011. 72 с.

Расписание погоды. Лицензированная гидрометеорологическая кампания. [Электронный ресурс]. <https://gr5.ru/> (дата обращения 26.01.2026).

Чубаренко Б.В., Двоглазова Н.В., Боскачев Р.В., Шушарин А.В. Пространственно-временная изменчивость гидрологических характеристик в зоне смешения реки Преголи (Юго-Восточная Балтика) и методические подходы к ее изучению // Океанологические исследования. 2024. Т. 52, № 1. С. 157–176. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).8.

Чубаренко Б. В., Шкуренок В.И. Физические механизмы проникновения соленых вод вверх по реке Преголе с учетом влияния рельефа дна // Физические проблемы экологии (экологическая физика). 2001. № 7. С. 80–88.

Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S. et al. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea // R. Kosyan (ed.) The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence. Switzerland: Springer Verlag. 2017. P. 149–191. doi: 10.1007/978-3-319-43392-9_6.

Hjulstrom F. (1939) Transportation of detritus by moving water: Part 1. Transportation. In P. D. Trask (Ed.). Recent marine sediments. A Symposium: Tulsa, Oklahoma. Pp. 5–31. Tulsa, OK: AAPG.

УДК 556.124.3(282.247.415.1)(045)

РАСЧЕТЫ СТОКА РЕК В ПЕРИОД СНЕГОТАЯНИЯ НА ВОДОСБОРЕ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Шайдулина А.А., Гырдымов Д.А., Скороход А.С.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия,
adelinash89@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты расчетов снеготаяния и притока талого стока к замыкающим створам рек водосбора Камского водохранилища и створу плотины на основе метода температурных коэффициентов и метода Калинина-Милюкова. Отклонение рассчитанного притока воды от фактического за период 2017–2024 составило 17.50%. Значение относительной погрешности для него по модулю составило 11.30%, немодулированное – минус 3.48%.

Ключевые слова: речной сток, снеготаяние, геоинформационные технологии

Введение. На Европейской территории России большая часть водных ресурсов сосредоточена в водохранилищах, стоящих как одиночно, так и объединенных в каскады. Изучение притока воды в них является важной задачей при планировании хозяйственной деятельности, управлении водными ресурсами и обеспечении безопасности гидротехнических сооружений. Многими авторами (Борщ и др., 2016; Сазонова, Китаев, 2013; Болгов и др., 2018), созданы и описаны различные методики прогнозирования и расчета притока воды в водохранилища. Часто они включают расчеты снеготаяния, поскольку накопление снежного покрова зимой и его таяние в весенний период является основным (до 50% и выше) источником питания искусственных водоемов. Такие расчеты основаны на методах водного и теплового баланса и их различных модификациях, которые подробно рассмотрены в работах (Кузьмин, 1961; Попов, 1968, 1979; Виноградов, 1988; Руководство..., 1989).

Материалы и методы. Методологической основой для расчетов снеготаяния в настоящей работе послужил метод температурных коэффициентов (Комаров, 1647; Лебедева, 1959; Калинин и др., 2022), а приток талого стока к замыкающему створу рассчитан по методу Калинина-Милюкова (1958), которые прошли широкую апробацию при подобных расчетах на реках РФ и Пермского края (Возняк, 2016).

Расчеты снеготаяния выполнены за период с 2017 по 2024 гг. на 9 частных речных водосборах бассейна Камского водохранилища, расчет притока – по их замыкающим створам, и в целом для бассейна Камского водохранилища по замыкающему створу плотины Камской ГЭС (рис. 1).

Водосбор Камского водохранилища занимает обширную территорию в 168 тыс. км² и включает в себя течение верхней и средней Камы. Отличительными особенностями водохранилища являются значительная боковая приточность (46%) и залесенность (79%) водосбора (Правила..., 2014; Шайдулина, 2023).

Результаты и их обсуждение. Расчеты, необходимые для оценки поступления воды в Камское водохранилище в период снеготаяния, можно разделить на 2 этапа:

1) расчеты снеготаяния на крупных речных водосборах для получения ежедневных значений слоев талого снега, которые выполнены с применением геоинформационной модели (Калинин, Шайдулина, 2023).

2) вычисление коэффициента стока дождевого паводка и расчет кривой добегаания стока до замыкающего створа выделенных речных водосборов с последующим расчетом общего притока воды в Камское водохранилище по методу Калинина-Милюкова (1958).

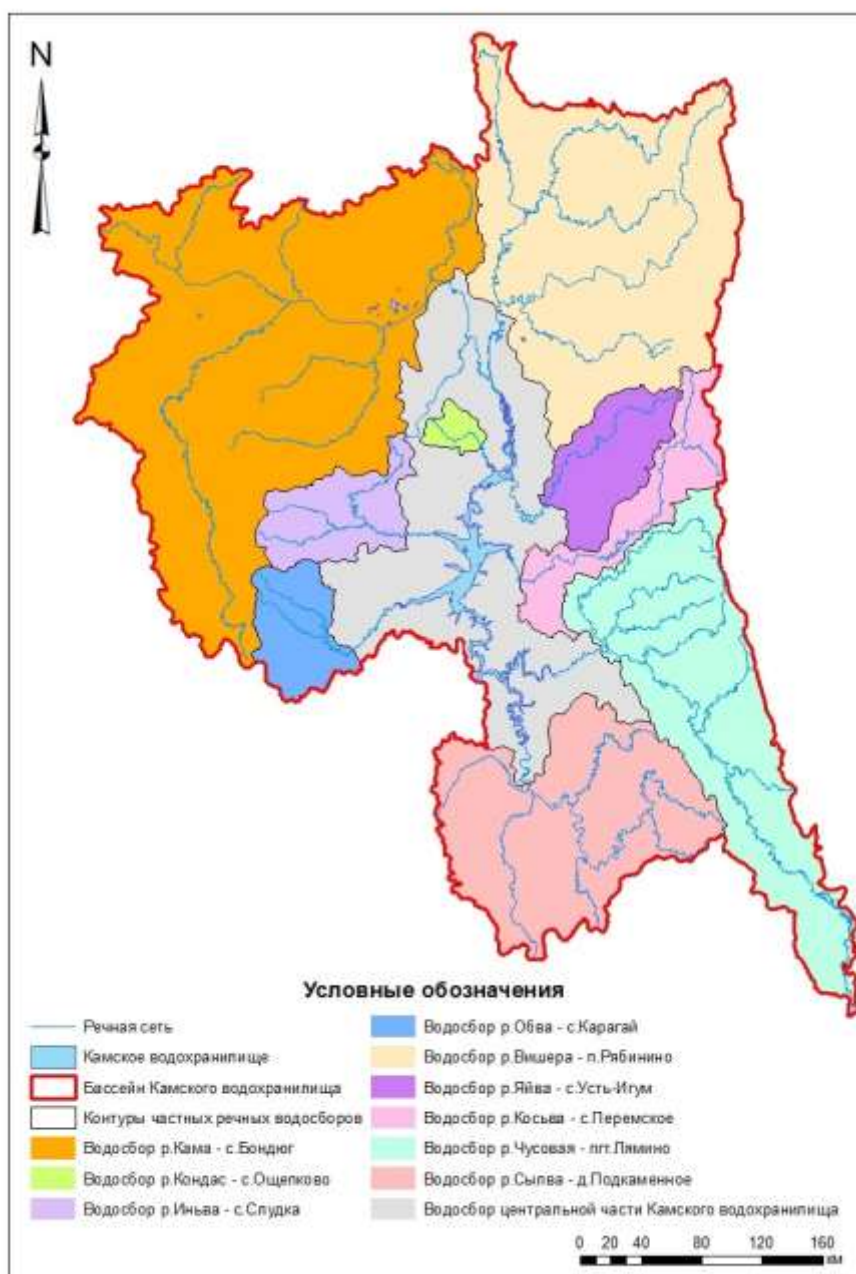


Рис. 1. Схема границ частных водосборов для расчетов снеготаяния и прока воды к замыкающему створу Камского водохранилища

Расчеты таяния снежного покрова на крупных речных водосборах бассейна Камского водохранилища, выполненные за исследуемый период по геоинформационной модели были проверены совместно с сотрудниками группы гидрологических прогнозов Пермского ЦГМС (ПЦГМС) и показали высокое соответствие (Шайдулина и др., 2025), и возможность их применения для расчетов ежедневного притока воды в Камское водохранилище. Они заключались в вычислении ежедневных расходов воды в замыкающем створе для речных водосборов бассейна Камского водохранилища и верификацию с наблюдаемыми значениями на гидрологических постах (рис. 2), а также в вычисление ежедневного притока воды к плотине Камской ГЭС. Для этого был найден средний слой стока стаявшего снежного покрова для всего бассейна Камского водохранилища, как среднее значение из суммы слоев стока для леса и поля в замыкающем створе по всем водосборам рек, впадающих в водохранилище. Результаты (на примере 2017 г.) представлены на рис. 3.

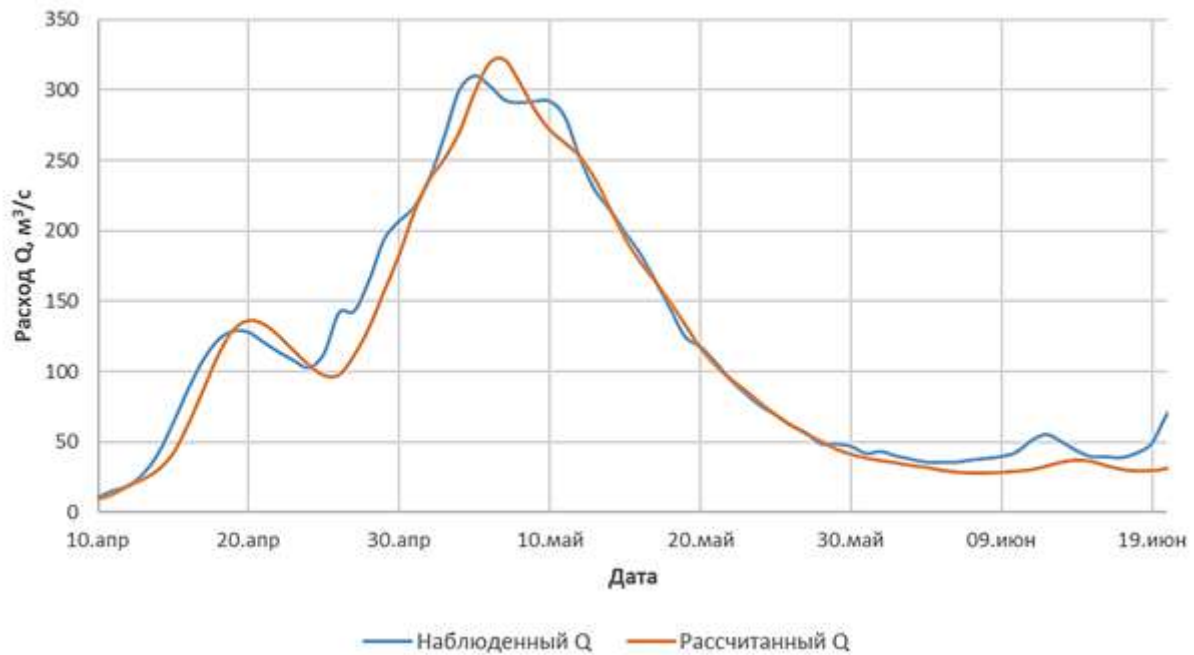


Рис. 2. Гидрографы весеннего половодья: наблюдаемый и рассчитанный, для поста р. Иньва – с. Слудка за 2017 г.

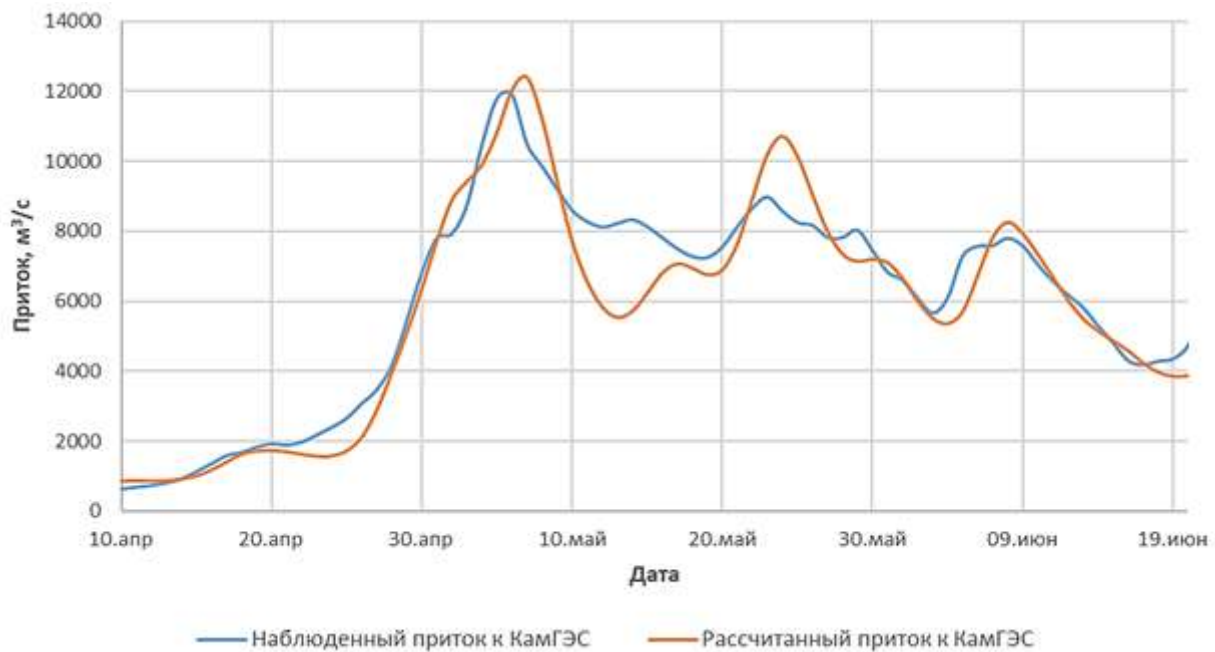


Рис. 3. Фактический и рассчитанный приток воды в створе р. Кама – плотина Камской ГЭС за 2017 г.

Для всех рассматриваемых водосборов выполнены расчеты притока воды к замыкающим створам за период 2017-2024 гг. и проведена их верификация с фактическими данными путем расчета относительной погрешности, рассчитанной как разность модельного и фактического значений, отнесенная к фактическому значению:

$$\delta = \frac{(Q_m - Q_f)}{Q_f} * 100\%$$

где Q_m – модельное значение притока, Q_f – фактическое значение притока.

Выполнены расчеты значений погрешностей по модулю, а также немодулированные. Последние дают представление о знаке отклонения, т.е. о том, отклоняется расчет в большую или меньшую стороны (при расчетах среднего эти значения могут взаимокompенсировать друг друга). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Количественное сравнение фактического и рассчитанного притока воды (δ) для бассейна Камского водохранилища за 2017-2024 гг.

Исследуемые водосборы	Относительная погрешность	
	$\delta, \%$	δ по модулю, %
р. Кама – с. Бондюг	–5.93	10.89
р. Кондас – с. Ощепково	–18.19	25.81
р. Иньва – с. Слудка	–3.57	12.27
р. Обва – с. Карагай	–8.51	19.94
р. Вишера – п. Рябинино	–2.36	10.90
р. Яйва – с. Усть-Игум	2.11	24.45
р. Косьва – с. Перемское	6.86	24.88
р. Чусовая – пгт. Лямино	–1.13	18.30
р. Сытва – д. Подкаменное	–13.01	16.29
р. Кама – плотина Камской ГЭС	–3.48	11.30
Среднее максимальное значение по водосбору Камского водохранилища	6.86	25.81
Среднее минимальное значение по водосбору Камского водохранилища	–18.19	10.89
Среднее значение по водосбору Камского водохранилища	–4.72	17.50

Выводы. Таким образом, за многолетний период 2017 - 2024 гг. отклонение рассчитанного притока воды от фактического по модулю для бассейна Камского водохранилища составляет 17.50%, среднее максимальное значение равно 25.81% на водосборе р. Кондас – с. Ощепково, а среднее минимальное – 10.89% на водосборе р. Кама – с. Бондюг.

Расчет притока воды к плотине Камской ГЭС по данным осредненных слоев талого стока с частных речных водосборов, полученный с применением геоинформационной модели возможен и является результативным. Значение относительной погрешности для него по модулю составляет 11.30%, немодулированное – минус 3.48%, что свидетельствует о высокой точности результатов моделирования и возможности его применения для водосбора Камского водохранилища.

Список литературы:

- Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Особенности временной изменчивости притока к озеру Байкал и водохранилищам Ангарского каскада ГЭС // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. №. 4. С. 6–19.
- Борщ С.В., Бураков Д.А., Симонов Ю.А. Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды Гидрометцентра России. 2016. №. 359. С. 106–127.

- Возняк А.А. Гидрологические прогнозы: Учебное пособие. Пермь: Перм. гос. ун-т., 2016. 224 с.
- Калинин Г.П., Милуков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Труды ЦИП. 1958. Вып. 66. 72 с.
- Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья // Лёд и снег. 2022. Т. 62 (1). С. 63–74. DOI:10.31857/S2076673422010116.
- Калинин В.Г., Шайдулина А.А. О верификации расчетов снеготаяния с данными наблюдений на метеорологических станциях // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: тр. IX Всероссийской научпрак. конф. с международным участием. Пермь, 2023. Т. 1. С. 100–104.
- Комаров В.Д. О процессах формирования половодья на малой реке и предвычисления его гидрографа // Тр. ЦИП. Вып. 6 (33). 1947. С. 3–41.
- Лебедева Н.Д. Расчет снеготаяния и метод краткосрочного прогноза даты наступления максимального уровня половодья на р. Каме // Тр. ЦИП, вып. 94. Москва: Гидрометеиздат, 1959. С. 15–33.
- Правила использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Каме. Федеральное агентство водных ресурсов, 2016. 202 с.
- Сазонова Д. Г., Китаев А. Б. Использование модели «Гидрограф ГГИ-2001» для оценки притока воды в Камское водохранилище // Географический вестник. 2013. №. 1 (24). С. 52–71.
- Шайдулина А.А. Пространственно-временные закономерности снеготаяния на водосборе Камского водохранилища: дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 2023. 178 с.
- Шайдулина А.А., Скороход А.С., Никитина Т.С. Особенности снеготаяния на водосборе Камского водохранилища в 2024 г // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2025. Т. 35. №. 1. С. 92–101.

Подсекция 1.2. Методы оценки гидрохимических показателей и качества вод

УДК 581.9:528.8:504.054(470.5)

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ РЕК СЕВЕРНОГО УРАЛА ПО ДИНАМИКЕ ЭКОСИСТЕМ РЕЧНЫХ ДОЛИН: ДИСТАНЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТЕРРИТОРИЙ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ И ПРИЧИНАМИ НАРУШЕННОСТИ

Владимирова Н.А.¹, Квашнина А.Е.², Смирнова М.А.³

¹ ООО «Лоретт», Инновационный центр «Сколково», Москва, Россия, *nadiopt@yandex.ru*

² Заповедник «Денежкин Камень», Североуральск, Россия, *akvaanna@gmail.com*

³ Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия, *msmirnova@binran.ru*

Аннотация. Индикатором экологических условий долин рек выступает почвенно-растительный покров, динамично реагирующий на смену экологической ситуации. В работе приводится анализ изменений в растительности рек Северного Урала (Калья, Каква, Ольховка, Тамшёр, Банная, Черная, Безымянная), проведенный наземными и дистанционными методами. На основе расчета динамики индекса NDVI по серии космоснимков Landsat за вегетационные сезоны (май-сентябрь) с 2000 по 2023 г. были выявлены участки рек с здоровым растительным покровом и с нарушенным в результате химического загрязнения. Проведено сравнение этих участков.

Ключевые слова: реки, долины рек, Северный Урал, загрязнение, растительность, ГИС, ДДЗ

Район исследования – долины рек Северного Урала в пределах Свердловской области. Горнодобывающая промышленность Уральского региона оказывает мощное техногенное воздействие на природу. Многие из предприятий в составе Уральской горнометаллургической компании (УГМК) не соблюдают экологических требований очистки и рекультивации в процессе добычи руды и при ее завершении при закрытии карьеров. Поллютанты, попадая в речные экосистемы, переносятся на большие расстояния, в результате чего в долинах рек происходят необратимые процессы. Реальное увеличение стока наносов происходит только в результате карьерных горнодобывающих разработок, неконтролируемой вырубке лесных угодий, и других форм антропогенного нарушения устойчивости склонов без проведения соответствующих противозерозионных мероприятий (Завадский и др., 2025). Тяжелые металлы попадают в реки в процессе окисления колчеданов, они являются одними из основных загрязнителей водной среды и характеризуются сильной токсичностью, ведущей к гибели ихтиофауны и всей речной биоты в целом. В водных экосистемах тяжелые металлы накапливаются в донных отложениях и при определенных условиях могут высвобождаться из донных отложений и вновь попадать в воду, что спустя десятки лет может привести к вторичному загрязнению вод тяжелыми металлами (Li et al., 2023; Lou et al., 2025). На 2023 год сообщалось, что уже восемь рек Северного Урала оказались под угрозой, а местные жители столкнулись с невозможностью использовать воду даже для хозяйственных нужд (Квашнина и др., 2023).

Для получения характеристик ненарушенных участков лесной растительности нами были предприняты исследования уральских рек, находящихся в стабильном состоянии и экологически благополучных условиях. На основе расчета динамики индекса NDVI по серии космоснимков Landsat за вегетационные сезоны (май-сентябрь) с 2000 по 2023 г. были выявлены участки рек с здоровым растительным покровом и с нарушенным в результате химического загрязнения и проведено сравнение полученных материалов.

Выбранные участки долин рек Калья и Каква находятся в экологическом равновесии, на них не выявлено химических и рудных загрязнителей, динамика вегетационного индекса NDVI растительного покрова долин этих рек демонстрирует свойства «здоровой» растительности. Участок долины реки Калья: прибрежные луга представлены осоковыми, канареечниковыми и кочкарноосоковыми сообществами; кустарники из ив (*Salix myrsinifolia*, *S. myrsinifolia*, *S. pyrolifolia*); леса елово-березовые травяные, осоково-травяные, таволговые. Участок долины реки Каква и впадающий в нее ручей Холодный: на каменистых мелководьях отмечены прибрежно-водные сообщества из *Petasites radiatus*, *Caltha palustris*; луга осоковые и лисохвостово-таволговые; кустарники из ив (*Salix viminalis*, *S. triandra*); долинные леса – преимущественно черемуховые, черемухово-сироольховые, ивово-сироольховые с участием ели, пихты травяные, папоротниково-травяные, а также березово-еловые с пихтой хвощово-травяные.

Для сравнения с ненарушенными реками были обследованы верховья притока р. Ольховка в районе медно-цинкового месторождения Ново-Шемурское (Ивдельский и Североуральский районы Свердловской области) и приток р. Турья в районе медно-колчеданного месторождения Валенторское (Карпинский район Свердловской области). В районе добычи полезных ископаемых Северного медно-цинкового рудника были исследованы реки Ольховка, Тамшёр, Банная, Черная и Безымянная, находящиеся на разных стадиях загрязнения (рис. 1). Для долин этих рек также были получены графики динамики NDVI растительного покрова. Для рек Ольховка, Тамшёр, Банная, Черная, Безымянная, Тамшёр по материалам ДЗЗ и полевым обследованиям в разное время выявлены участки с разной степенью деградации растительного покрова вплоть до полной его гибели (Владимирова, Квашнина, 2019). Находящиеся на склонах хребта Шемур отвалы с содержанием колчеданов активно участвуют в формировании водотоков рек Ольховка, Тамшёр, Банная, Черная, Безымянная. Реки Ольховка и Тамшёр являются притоками р. Шегультан, а реки Банная и Черная – р. Тальтия. Реки Шегультан и Тальтия являются важными водотоками заповедника «Денежкин Камень» и берут начало на его территории (Квашнина, Владимирова, 2019). Первые участки с погибшей растительностью были обнаружены рядом с карьером Тарньёрский в 2009 г., а рядом с карьерами Шемурским и Ново-Шемурским – в 2013 г. (восточная часть Шемурского карьера). Площади погибшей растительности постоянно увеличиваются, причем скачки увеличения площадей отмечены в 2016, 2018 и 2020 г. В июле 2021 г. площадь погибшей растительности, по оценкам дешифрирования данных снимка Sentinel-2 от 19 июля 2021 г., составляет не менее 700 га. В 2020 и 2021 г. было выявлено увеличение площадей гибели растительного покрова вниз по течению, зафиксировано появление новых площадей массового усыхания растительности в долинах рек на удалении от карьеров (Владимирова, Квашнина, 2019; Малышев и др., 2019; Квашнина и др., 2023). На сайте Уральского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды приводятся документы о наблюдениях за загрязнением поверхностных вод суши, проводимых в пунктах государственной наблюдательной сети Уральского УГМС, отмечаются экстремальные уровни загрязнения для рек Тавда, Шегультан, Сосьва, Ивдель за период 2019–2025 годы. Так, к примеру, с июня 2022 г. начинается резкое повышение содержания микроэлементов меди и цинка в пробах вод по данным УГМС в реке Сосьва ниже устья реки Шегультан (Уральское..., 2026).

Нами проведено сравнение рек Северного Урала в благополучных и в загрязненных условиях: Калья (чистая) – Ольховка вблизи Новошемурского карьера (загрязненная) и Каква (чистая) – Безымянная вблизи Валенторского карьера (загрязненный). Сравнение временных рядов по парам участков на этих реках показывает четкую тенденцию постепенной и усиливающейся деградации растительности на загрязненных участках, тогда как на нетронутых участках временная кривая изменения NDVI характерна для здорового леса. В районе воздействия на лесные экосистемы карьеров Северного медно-цинкового месторождения нами были отобраны пары схожих по типу лесных формаций участков на реках, подвергшихся воздействию стока загрязненных вод, и рядом с ними условно чистых

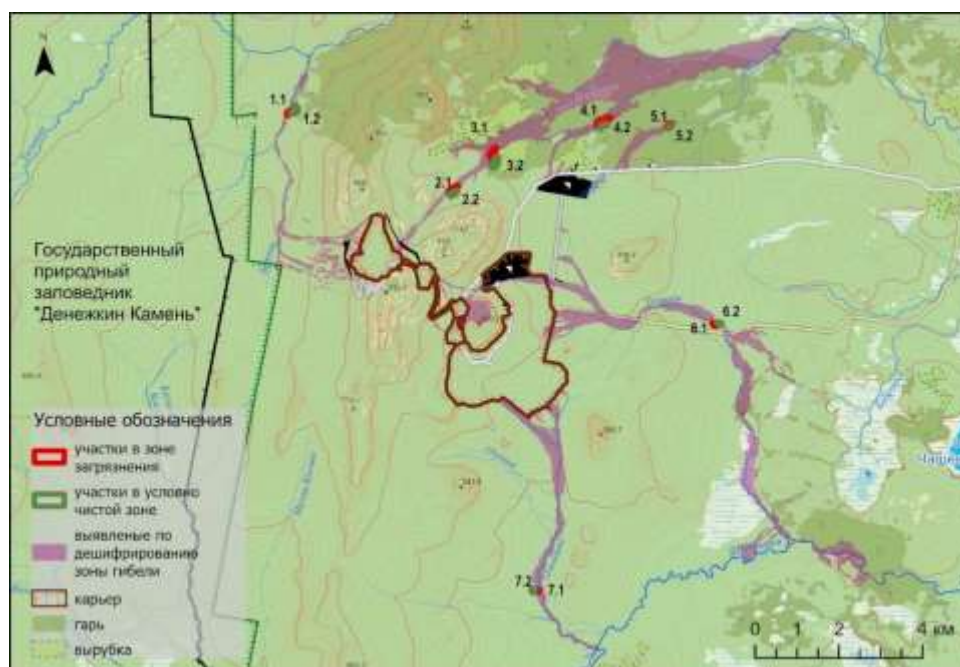


Рис. 1. Район исследований

участков. Для проанализированных участков долин рек номера на карте соответствуют номерам в табл. 1, так, к примеру, красные контуры 1.1, 2.1, 3.1 и т.д. – это участки в зоне загрязнения, а зеленые контуры 1.2, 2.2. – участки в условно чистой зоне.

Таблица 1. Пояснения к карте района исследований.

Название реки (номер участка)	Тип лесной формации или нарушения (Квашнина, 2022)
Банная (1.1, 1.2)	Темнохвойные леса средневозрастные
Безымянная (2.1, 2.2)	Ветровал
Безымянная (3.1, 3.2)	Гарь 2010 г.
Безымянная (4.1, 4.2)	Темнохвойные леса старовозрастные
Черная (5.1, 5.2)	Гарь старая
Тамшёр (6.1, 6.2)	Темнохвойные леса средневозрастные
Ольховка (7.1, 7.2)	Вторичные сосново-березовые леса средневозрастные

Анализ временных рядов NDVI показал, что химическое воздействие везде привело к постепенной и все время ускоряющейся деградации растительности по сравнению с условно чистыми участками. Следует отметить, что условно чистые участки все равно хуже по продуктивности, чем обследованные нами участки на реках вне зоны воздействия рудников УГМК. Деградация идет по различным сценариям в зависимости от того, было ли какое-либо иное воздействие на лесные экосистемы. Все загрязненные участки демонстрируют синдром хронического стресса, которые выражаются в нарушении фенологических фаз: задержка весеннего старта на 2–3 недели (майские значения NDVI на 0.10–0.15 ниже контроля с 2016

г.); сокращение вегетационного сезона (2–4 недели); более раннее осеннее падение NDVI (сентябрьские значения на 0.10–0.20 ниже контроля). На всех участках средние значения NDVI упали до 0.4–0.5, что соответствует значению «скудная, разреженная древесно-кустарниковая растительность». При синхронном воздействии наблюдается синергетический эффект, пожар и ветровал создают первичное повреждение надземной фитомассы, а химическое загрязнение блокирует восстановление растительного покрова. Контрольные участки демонстрируют достаточно устойчивое восстановление после пожара и ветровала, а на загрязненных никакого восстановления не происходит. Так, на гари без участия химического загрязнения на р. Безымянная (значения NDVI практически вернулись к предпожарным уровням (0.83 – здоровый лес). На участке старой гари на р. Черная ситуация выглядит так, что предшествующий пожар частично смягчил последствия химического загрязнения. Разрыв с контролем (0.10–0.15) меньше, чем у пар без воздействия гарей и ветровалов (0.25–0.40). Можно предположить, что наземные экосистемы на этом участке недостаточно восстановились, и химическое загрязнение дало меньший разрыв по значениям NDVI, чем для пар со здоровой/поврежденной растительностью.

Индикатором экологических условий пойм рек выступает почвенно-растительный покров, динамично реагирующий на смену экологической ситуации (Никонова и др., 2013). Спектральные характеристики здоровой растительности меняются как каждый год, так и в течение сезона, но анализ временного ряда снимков за вегетационный период может дать нижний порог их значений. Если где-то в сходных природно-экологических условиях мы наблюдаем значение ниже этого порога, то это может оказаться сигналом о негативных изменениях в экосистеме (Смирнова, Владимирова, 2025). Обследованные уральские реки, находящихся в экологическом равновесии, без выраженных химических и рудных загрязнителей в настоящий момент можно использовать как эталонные участки малонарушенных долин рек. ГИС эталонных участков с выявленными спектральными характеристиками «здоровой» растительности и загрязненных участков с спектральными характеристиками «умирающей» растительности в дальнейшем планируется использовать для проведения мониторинга состояния растительности речных долин Уральского региона.

Исследования проведены в рамках научно-исследовательской работы по теме № 126012716028-6 «Изучение естественного хода процессов и явлений в целях обеспечения сохранения природной среды, в том числе естественных экологических систем, объектов животного и растительного мира территории заповедника «Денежкин Камень» и сопредельных территорий», госзадания БИН РАН по теме № 1023030900090-5 «Растительность Европейской России и Северной Азии: разнообразие, динамика, типы местообитаний».

Список литературы:

Владимирова Н. А., Квашнина А. Е. Оценка масштабов гибели лесных экосистем в результате разработки месторождении Северного медно-цинкового рудника по серии космических снимков 2009–2018 гг. // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии: Доклады VII Всероссийской конференции (Москва, 22–24 апреля 2019 г.). М.: ЦЭПЛ РАН. 2019. С. 29–31.

Завадский А. С., Беркович К. М., Камышев А. А. Устойчивость русел рек бассейна р. Урал к заилению // Географический вестник. 2025. № 4 (75). С. 119–130.

Квашнина А. Е. Создание ГИС-атласа заповедника «Денежкин Камень» и прилегающей территории. Создание WEB-карты (2019–2021 гг.). ФГБУ «Государственный заповедник «Денежкин Камень» // Научные исследования в заповедниках и национальных парках Российской Федерации (2015–2021 гг.). Вып. 5. Ответственный редактор: Д.М. Очагов; Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации; Всероссийский

научно-исследовательский институт охраны окружающей среды «ВНИИ Экология». Симферополь, 2022. С. 154–155.

Квашнина А. Е., Владимирова Н. А. Экспресс-оценка последствий неконтролируемого подотвального стока на северном медно-цинковом руднике и проблемы заповедника «Денежкин Камень», с ним связанные // География и современные проблемы экологического образования: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посв. 100-лет. со дня рожд. Почетного члена РГО, д. г. н., проф. В. И. Прокаева, 16-20 сентября 2019 г., Екатеринбург / Урал. гос. пед. унт.; под ред. О. В. Янцер, Д. Н. Липухина, Ю. Р. Ивановой. Екатеринбург. 2019. С. 139–145.

Квашнина А. Е., Возьмитель Ф. К., Хамедов В. А. Динамика гибели лесной растительности в районе добычи полезных ископаемых на метасоруднеях северного медно-цинкового рудника в Свердловской области // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 1. Статья № 122. С. 1–11. DOI: 10.31509/2658-607x-202361-123

Малышев Д. А., Возьмитель Ф. К., Пузикова А. А., Солдатова И. С. Оценка состояния древостоев в зоне влияния токсичных подотвальных стоков // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве. Материалы III международной научно-практической конференции молодых ученых. 2019. С. 231–233.

Смирнова М. А., Владимирова Н. А. Состояние растительного покрова долин рек Среднего Урала (на примере ряда рек Пермского края и Свердловской области) // X Всероссийская конференция с международным участием и элементами школы по водным макрофитам «Гидробиотаника 2025». 18–22 октября 2025 г. Борок. 2025.

Уральское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Режим доступа: URL: http://svgimet.ru/?page_id=181 (дата обращения – 02.02.2026).

Li Z., Li X.Z., Wang S.H., Che F.F., Zhang Y., Yang P.J., Zhang J.B., Liu Y.X., Guo H.C., Fu Z.H. Adsorption and desorption of heavy metals at water sediment interface based on bayesian model // Journal of Environmental Management. 2023. Mar 1; 329: 117035. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.117035

Lou Sh., Zou Yu., Liu Sh., Zhong G., Zhang Zh. Influencing factors of heavy metals in the coastal areas // Eroziya pochv i ruslovye processy. 2025. № 2. P. 51–57. DOI: 10.71367/3034-4638-2025-2-2-51-57

УДК 550.4

**ОБРАБОТКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ФАКТОРНОГО И
КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА НА ПРИМЕРЕ ИВАНЬКОВСКОГО
ВОДОХРАНИЛИЩА**

Григорьева М.Л., Гришанцева Е.С., Воробьев С.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

Margo.leonidovna@bk.ru

Аннотация. Была создана база данных по содержанию микроэлементов как в абиогенных, так и в биогенных компонентах экосистемы Иваньковского водохранилища. С использованием факторного и корреляционного анализов были выявлены геохимические закономерности распределения химических элементов в воде, донных отложениях, почвенном и снеговом покрове, а также в высшей водной и наземной травянистой растительности, двустворчатых моллюсках и рыбах.

Ключевые слова: Геохимия, водные экосистемы, математическая обработка геохимических данных.

Иваньковское водохранилище – одно из верхних водохранилищ в Волжском каскаде – играет стратегическую роль, поскольку служит основным источником питьевого водоснабжения города Москвы. Это обуславливает повышенные требования к качеству его вод и экологическому состоянию всей акватории. В связи с этим, данный водный объект на протяжении многих десятилетий вызывает большой интерес ученых. Исследования его гидрохимического режима, уровней загрязнения, состояния биоты и донных отложений широко представлены в многочисленных научных работах, охватывающих различные аспекты и временные периоды (Абакумов и др., 2000). Однако, накопленный массив данных носит зачастую разрозненный характер. Существует значительная проблема систематизации и комплексной интерпретации имеющихся результатов, полученных различными методиками. Отсутствие единой структурированной информационной базы затрудняет выявление общих пространственно-временных геохимических закономерностей, достоверную оценку антропогенной нагрузки и прогнозирование изменений экосистемы водохранилища.

Целью настоящей работы является сбор, обобщение геохимических данных, а также выявление общих геохимических закономерностей распределения микроэлементов в компонентах экосистемы Иваньковского водохранилища. Для этого была создана единая база данных, которая стала основанием для дальнейшего исследования. Уникальность этой базы заключается в ее комплексности: она объединила данные о содержании широкого спектра микроэлементов не только в традиционных абиогенных (вода, донные отложения, почвы), но и в ключевых биогенных компонентах, которые способны выступать в качестве биоиндикаторов загрязнения водоема.

База данных включает сведения о содержании микроэлементов как в абиогенных компонентах: воде, донных отложениях, почвах водосборной территории и снеговом покрове как индикаторе атмосферного потока веществ, так и в биогенных компонентах: наземной травянистой растительности, высшей водной растительности (макрофитах), организмах-биоиндикаторах – двустворчатых моллюсках, являющихся классическими аккумуляторами загрязняющих веществ, и рыбах, которые занимают вершину трофической цепи, значимой для оценки рисков здоровья человека. Формирование базы происходило на основе обобщения ранее полученных авторами и уже опубликованных материалов, что позволило создать массив информации, отражающий многолетнюю динамику в период с 1992 по 2024 год.

Технически создание базы данных было реализовано в программе MS Office Excel, что обеспечило удобство структурирования, ввода и первичной сортировки информации. Основным этапом работы была математико-статистическая обработка, выполняемая с применением специализированного программного обеспечения «GOLD-геохимик»,

разработанного на геологическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова (Воробьев, 2016). Использование данного ПО позволило провести:

1. Корреляционный анализ для выявления парных связей между содержаниями элементов в различных компонентах, что указывает на общность их источников или поведения в экосистеме.

2. Факторный анализ (метод главных компонент) для выявления скрытых многомерных закономерностей. Этот метод позволил сократить размерность данных, сгруппировать элементы в ассоциации, контролируемые общими факторами (например, «антропогенное промышленное воздействие», «биогенная аккумуляция»), и оценить вклад каждого фактора в общую геохимическую структуру данных.

Таким образом, реализованный подход позволил перейти от множества разрозненных данных к систематизации геохимической информации о содержании микроэлементов в компонентах экосистемы Иваньковского водохранилища. Результаты работы обеспечивают научно обоснованную базу для мониторинга, оценки экологических рисков и разработки управленческих решений, направленных на сохранение качества вод этого жизненно важного для Москвы источника.

Работа выполнена по Госзаданию МГУ № 121071200143-2.

Список литературы:

Абакумов В. А., Ахметьева Н. П., Бреховских В. Ф. и др. Иваньковское водохранилище: современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука 2000. 344 с.

Воробьев С. А. Информатика. Математическая обработка геолого-геохимических данных. Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2016. 266 с.

УДК 556

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ БОРА ($\delta^{11}\text{B}$) ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЕГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ НА ФОНЕ ЗАСОЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ

Дребот В.В.¹, Борзенко С.В.², Шуакар-Сташ О.^{3,5}, Стотлер Р.⁴

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, Россия, *DrebotVV@ipgg.sbras.ru*

²Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

³Isotope Tracer Technologies Inc., Уотерлу, Канада

⁴Университет Уотерлу, Уотерлу, Канада

⁵Канада, Гуэлфский университет, Гуэлф, Канада

Аннотация. Представлены первые результаты изучения распределения стабильных изотопов бора ($\delta^{11}\text{B}$) в подземных водах Юго-Восточного Забайкалья. Показано, что значения $\delta^{11}\text{B}$ находятся в пределах от -11.87‰ до 8.13‰ и демонстрируют рост по мере увеличения щелочности и солёности раствора. Выдвинуто предположение, что засоление исследуемых подземных вод, аккумуляция бора и его сорбция глинистыми минералами – это связанные процессы, которые контролируются взаимодействием в системе «вода-порода».

Ключевые слова: изотопы бора, подземные воды, засоление

Засоление является актуальной и глобальной экологической проблемой, которая ведет к росту минерализации воды с последующим ухудшением качества при подаче в бытовые и сельскохозяйственные секторы, наиболее характерной для засушливых территорий. В последние десятилетия она особенно остро стоит в Азиатско-Тихоокеанском регионе, где вода зачастую является относительно ограниченным ресурсом, нехватка которого, скорее всего, будет обостряться в результате изменения климата (Всемирный..., 2021), и к которому относится, граничащий на юге с Монголией, район исследования в Забайкалье, где на фоне растущей аридизации климата развиваются процессы засоления и фиксируется рост содержания бора в подземных водах до значений выше ПДК. При этом нередко водные объекты, испытывающие на себе засоление, как и в случае районом исследования, являются трансграничными (например, р. Колорадо вдоль границы Мексики и США; Аральское море на границе Казахстана и Узбекистана и др.), что создает дополнительные трудности в устойчивом управлении водными ресурсами (Sowers et al., 2011).

Изотопы бора в настоящее время являются одним из новейших геохимических инструментов, используемых в гидрологических и гидрогеологических исследованиях. Бор (В) имеет два стабильных изотопа ^{10}B и ^{11}B , большая разница масс которых приводит к их значительному фракционированию в природе, которое может происходить в результате испарения, адсорбции/соосаждения, взаимодействия в системе вода-порода, а также биологических процессов. При этом в зоне аэрации соотношения изотопов бора контролируются главным образом путем адсорбции на глинистых минералах (Vengosh, Spivack, 2000). В природных водах бор находится в форме борной кислоты $\text{B}(\text{OH})_3$, которая имеет тригональную структуру, и его равновесного конкурента тетраэдрического борат-иона $\text{B}(\text{OH})_4^-$. Распределение этих форм миграции контролируется рН раствора. При более низких значениях рН (<7) практически весь бор находится в форме $\text{B}(\text{OH})_3$, а с ростом щелочности увеличивается доля тетраэдрического $\text{B}(\text{OH})_4^-$, который интенсивнее сорбируется глинистыми минералами, чем незаряженная борная кислота. Степень адсорбции В на глинах также связана с ионной силой раствора, зависящий от минерализации (McBride, 1997), способствуя удерживанию бора в воде при повышении ее солёности (Vengosh, 2013). В этой связи бор относится к числу элементов (наряду, например, с мышьяком, селеном и др.), склонных к концентрированию в подземных водах на фоне засоления.

Изотопные отношения бора ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$) измеряли относительно стандарта NIST SRM-951 в 14 пробах воды и 3 образцах вмещающих пород методом масс-спектрометрии с термической ионизацией на приборе Triton Thermo Scientific (США) в канадской лаборатории Isotope Tracer Technologies (г. Уотерлу). Результаты представлены в виде $\delta^{11}\text{B}$, где:

$$\delta^{11}\text{B} (\text{‰}) = \left[\frac{(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{проба}}}{(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{стандарт NBS951}}} - 1 \right] \times 1000$$

Содержания бора определяли методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) в ПНИЛ ГГХ ТПУ (г. Томск). Формы миграции бора рассчитывали в программе The Geochemist's Workbench (GWB) с использованием баз данных thermo.tdat и phrqptz.tdat.

Пробы воды отбирали вокруг самых крупных водных объектов Забайкальского края – трансграничных Торейских озер (рис. 1а). Основная особенность региона – это изменчивый гидрологический режим, в результате которого широко распространенные здесь соленые озера практически полностью пересыхают раз в 25–30 лет, после чего наступает фаза увлажнения, и они снова наполняются водой. Последний маловодный период начался еще в 1999 г., а первые признаки обводнения появились только в 2021 г., т.е. в регионе фиксируется затянувшаяся почти на 10 лет аридизация (Обязов и др., 2021). Уровень грунтовых вод в засушливый период также снижается, поэтому их участие в питании озер уменьшается. По мере понижения абсолютных отметок рельефа от области питания в сторону сброса, химический тип исследуемых вод постепенно сменяется от Ca-HCO_3 к Na-HCO_3 , демонстрируя признаки содового засоления. Общая минерализация и pH воды увеличиваются от 0.2 до 3.2 г/л и 6.7 до 8.9 соответственно в том же направлении (рис. 1б).

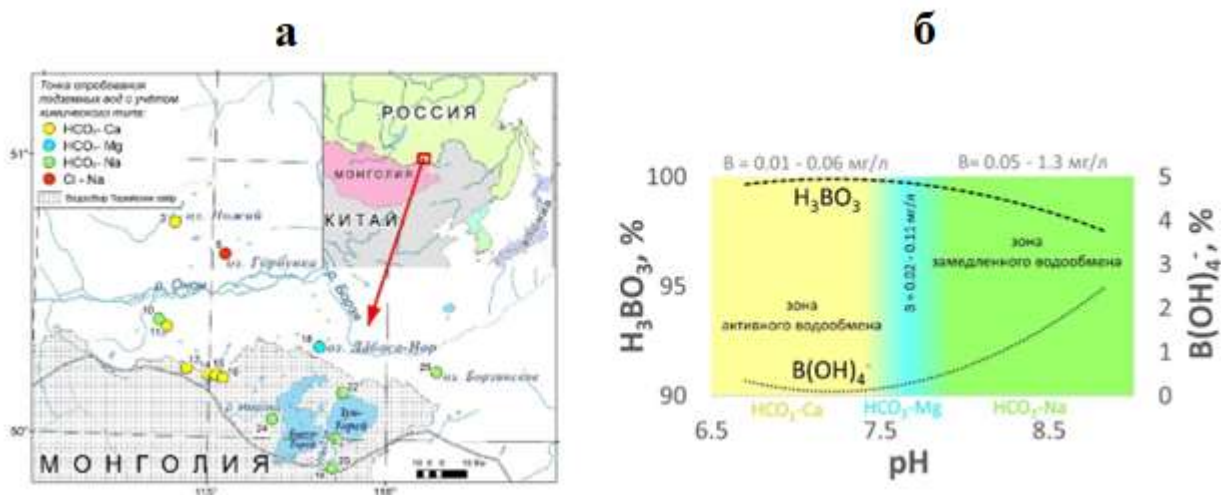


Рис. 1. Обзорная карта района исследования с нанесением точек опробования вод с учетом их химического типа (а); соотношение форм миграции бора в зависимости от pH воды и содержания элемента (б)

Содержание бора в исследуемых подземных водах варьирует от 0,01 ppm до 1,3 ppm, при этом четко прослеживается его симбатное увеличение с минерализацией и pH (рис. 2а), достигая наибольших значений в точках с максимальной соленостью и щелочностью. Значения $\delta^{11}\text{B}$ находятся в пределах от -11.87‰ до 8.13‰, также демонстрируя рост по мере увеличения щелочности раствора (рис. 2а). При этом наиболее низкие показатели $\delta^{11}\text{B}$ характерны для вод Ca-HCO_3 и Mg-HCO_3 типов, а высокие – для Na-HCO_3 .

Содержание бора в породах значительно выше и увеличивается от 7.9 ppm и 10.5 ppm в граните и базальте района исследования до 19.6 ppm в глинистом сланце. $\delta^{11}\text{B}$ пород находится на одном уровне с подземными водами и соответствует их средним показателям (от -1.4‰ до

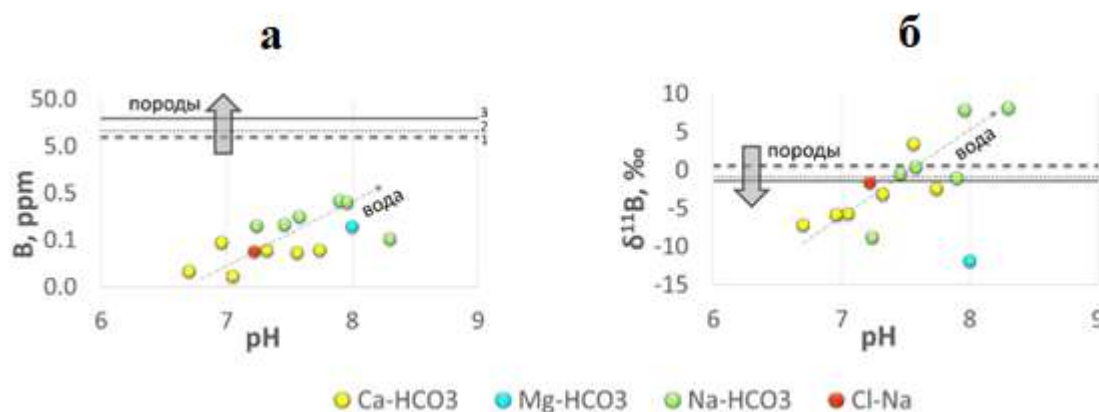


Рис. 2. Зависимость pH от В (а) $\delta^{11}\text{B}$ (б) исследуемых вод и пород региона (1 – гранит, 2 – базальт, 3 – глинистый сланец)

0.6‰). Однако в случае с изотопным составом наиболее тяжелым по изотопному составу бора оказался уже гранит, а легким - глинистый сланец. Согласно расчетам в GWB, основная форма миграции бора в исследуемых водах – H_3BO_3 , при этом с ростом pH до 7.5 и более увеличивается доля $\text{B}(\text{OH})_4^-$ (рис. 1б).

Таким образом, увеличение pH раствора ведет к росту интенсивности миграции бора в форме $\text{B}(\text{OH})_4^-$, которая сорбируется глинистыми минералами более интенсивно, чем другие формы. Степень адсорбции бора глинами также увеличивается с ростом ионной силы раствора, зависящей от солености воды (McBride, 1997). Более высокая доля борат-ионов, по-видимому, может привести к общему удерживанию бора при повышении минерализации и обеспечивает его концентрирование в исследуемых подземных водах до значений выше ПДК. Этот процесс выражается в изотопном фракционировании бора, где ^{11}B имеет тенденцию преимущественно включаться в тригональные формы, тогда как ^{10}B избирательно фракционирует в тетраэдрические, а его селективное удаление с $(\text{OH})_4^-$ в твердую фазу приводит к увеличению $\delta^{11}\text{B}$ остаточного раствора в регионе, как это было показано, например, в грунтовых водах Калифорнии и Израиля (Vengosh, 2013). Изотопный состав бора в глинистом сланце при этом облегчается в сравнении с первичными породами и составляет -1.4‰.

Так, показано, что засоление исследуемых подземных вод, аккумуляция бора и его сорбция глинистыми минералами – это связанные процессы, которые контролируются взаимодействием в системе «вода-порода», что отражается в распределении изотопных сигнатур $\delta^{11}\text{B}$. В настоящее время данные об изотопном составе бора из-за значительных вариаций в природе используются их при решении широкого спектра гидрологических и геологических задач, таких как определение условий осадконакопления, оценка загрязнения грунтовых вод, реконструкции древних морских обстановок, изучение гидротермальных и микробиологических процессов и мн. др. Данное исследование продемонстрировало перспективы применимости изотопных отношений бора как в качестве трассера взаимодействия в системе вода-порода на фоне засоления в условиях меняющегося климата.

Работа выполнена при поддержке проектов ФНИ РАН (№ FWZZ-2026-0047 и № 121032200070-2). Авторы благодарят лабораторию Isotope Tracer Technologies за возможность измерить изотопные отношения бора ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$).

Список литературы:

Всемирный доклад ООН о состоянии водных ресурсов: Ценность воды. 2021. 187 с.

Обязов В. А., Кирилюк В. Е., Кирилюк А. В. Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-восточного Забайкалья и Северо-восточной Монголии // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3. № 3. С. 204–232.

McBride M. B. A Critique of Diffuse Double Layer Models Applied to Colloid and Surface Chemistry // Clays Clay Miner. 1997. Vol. 45. No. 4. P. 598–608.

Sowers J., Vengosh A., Weinthal E. Climate change, water resources, and the politics of adaptation in the Middle East and North Africa // Clim. Change. 2011. Vol. 104. No. 3–4. P. 599–627.

Vengosh A. Salinization and Saline Environments // Treatise on Geochemistry: Second Edition. Elsevier Inc., 2013. P. 325–378.

Vengosh A., Spivack A. J. $\delta^{11}\text{B}$, Rare Earth Elements, $\delta^{37}\text{Cl}$, ^{32}Si , ^{35}S , ^{129}I // Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Boston, MA: Springer US, 2000. P. 479–510.

УДК 528.88

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Кутузов А.В., Поддубный С.А.

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия
kutuzov@ibiw.ru

Аннотация. Для создания тепловых карт Рыбинского водохранилища использовались данные фотосъемки в разных полосах спектра со спутников Landsat-8(9) и Sentinel-2, а также метеорологические параметры региона. Показано хорошее соответствие данных дистанционного зондирования с температурой поверхности воды, измеренной в полевых условиях.

Ключевые слова: водохранилище, температура воды, дистанционное зондирование

Натурные (судовые) измерения температуры воды в крупном водоеме носят точечный характер, тогда как спутниковая съемка (ДЗЗ) зачастую позволяет одновременно охватить измерениями всю площадь водоема (например, спутниковая сцена 200×200 км) (Кутузов, 2016). Современные спутниковые снимки дают возможность дистанционно осуществлять мониторинг температуры поверхности воды и ряда других показателей на качественно ином уровне, дополняя и даже частично заменяя непосредственно полевые исследования.

Объектом исследования выбрана акватория Рыбинского водохранилища. Пространственное распределение температуры воды получено на основе данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) спутниками Landsat 8-9 в летне-осенний период с 2016 по 2022 гг. Для идентификации данных ДЗЗ использованы материалы судовых измерений температуры воды в августе 2022 г. Предварительное выделение береговой линии водохранилища при разных уровнях воды проводилось с использованием серии спутниковых сцен ДЗЗ (данные спутников Landsat-5–9, Sentinel-2). Анализ спутниковых снимков выполнялся в ближнем инфракрасном оптическом спектре NIR, для выявления диапазона значений пикселей, соответствующих яркости водной поверхности (Географические..., 2024). На основе автоматической классификации для каждого снимка выделены 3 градации температурных зон: высокой, средней и низкой температуры (Кутузов, 2025; Географические..., 2024). Проведенный анализ данных ДЗЗ позволил выявить сезонную динамику поля температуры воды в поверхностном слое водохранилища. В начале лета происходит интенсивный прогрев мелководий вдоль западного побережья водоема, а также поступление более теплых вод от его речных плесов (рис. 1 а, б).

Горизонтальные градиенты температуры максимальные – 3.4°C. В июле при относительно маловетреной погоде и достижении максимального прогрева водохранилища градиенты температуры не превышают 1°C. Пространственная изменчивость поля температуры может определяться сгонно-нагонными явлениями совместно с формированием горизонтальной циркуляции водных масс (Поддубный, Сухова, 2002).

В конце августа – начале сентября, в период постепенной потери тепла водной массой водохранилища, мелководья в силу их меньшего теплосодержания быстро охлаждаются. Горизонтальные градиенты температуры воды снова достигают 2.5–3.5°C. В западной, восточной и юго-восточной частях центральной части водоема отмечаются аномалии более теплой воды, локализация которых может быть связана с наличием в этих частях водохранилища преобладающих круговоротов воды (рис. 1 в–д).

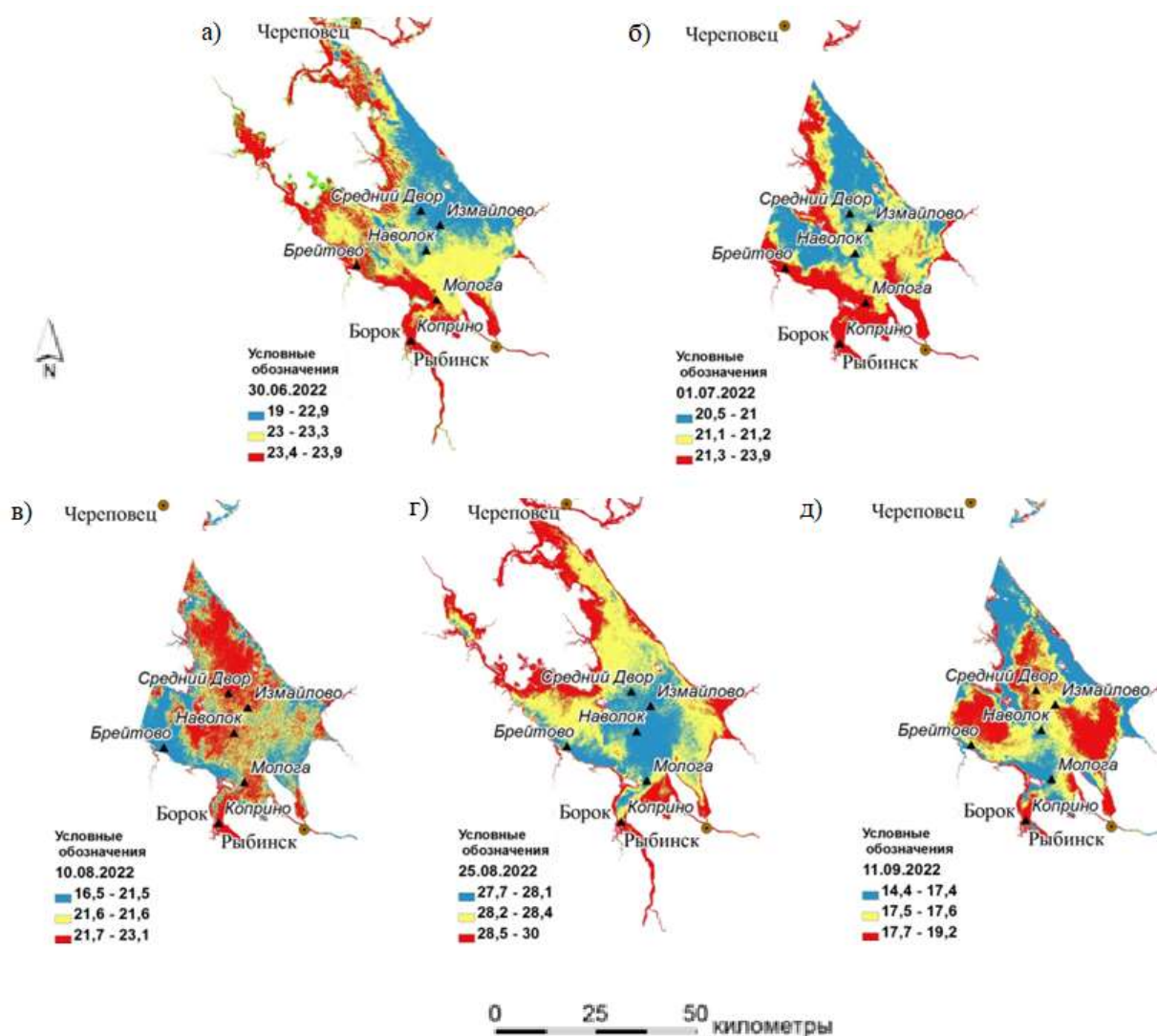


Рис. 1. Динамика теплового поля в течение «теплого сезона» 2022 г.

Идентификация полученных спутниковых тепловых карт поверхностного слоя водохранилища проводилась на основе их сравнения с температурами воды, измеренными контактным методом 10 августа 2022 г. синхронно с пролетом спутника. Выявлено, что температура воды, измеренная на горизонте 0.5 м в дневные часы 10 августа 2022 г., была в среднем выше на 0.6°C , по сравнению со спутниковыми данными. Различия между температурой воздуха и температурой воды по спутнику в среднем составили 0.3°C (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение контактных и спутниковых изменений температуры воды ($^{\circ}\text{C}$) на акватории Рыбинского водохранилища 10 августа 2022 г.

Станция	Температура		
	воздуха	воды ДЗЗ	воды in situ
Молога	20.6	21.6	22.2
Наволоок	22.4	21.6	22.1
Измайлово	22.4	21.5	22.3
Средний Двор	21.7	21.6	22.1
Брейтово	21.7	21.3	21.8
<i>среднее значение</i>	<i>21.8</i>	<i>21.5</i>	<i>22.1</i>

Выявленное уменьшение температуры поверхности воды на 0.6°C , зарегистрированное спутником по отношению к судовым измерениям, могло быть обусловлено наличием тонкого

скин-слоя (~ 0.1 мм), который обычно на $0.1\text{--}0.5^\circ\text{C}$ холоднее, чем ближайшие подповерхностные воды. Именно в этом слое формируется температура, измеряемая спутником в ИК-диапазоне, а сам перепад температуры возникает из-за вертикального потока тепла в приводный слой атмосферы через температурный миллиметровый пограничный слой на поверхности водоема (Рубакина и др. 2021).

Таким образом, в результате исследований показана возможность дистанционного определения температуры поверхности воды водохранилища с достаточно хорошим ее соответствием данным судовых измерений. Сезонная динамика тепловых полей поверхностного слоя Рыбинского водохранилища зависит от интенсивности проявления метеорологических параметров в суточном и синоптическом масштабе времени. В серии карт тепловое поле водохранилища отражает также особенности рельефа дна и структуры интегральной циркуляции воды.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 124032100076-2.

Список литературы:

Географические методы изучения экосистем внутренних водоемов /отв. ред. Поддубный С.А. Ярославль: Филигрань. 2024. 206 с.

Кутузов А.В. Оперативный спутниковый мониторинг скоплений планктонных водорослей и количественная оценка их плотности // Научный журнал Пермского университета Географический вестник. 2016. № 3(38). С. 160–168.

Кутузов А.В. Создание тепловых карт зарастающих мелководий для крупных водоемов методами ДЗЗ // Гидробиотика 2025: материалы конференции. Борок: ИБВВ РАН; Ярославль: Канцлер. 2025. С. 52–53.

Поддубный С.А., Сухова Э.В. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах. Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский Дом печати», 2002. 120 с.

Рубакина В.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. Сезонная и суточная изменчивость характеристик термического скин-слоя на основе сопоставления спутниковых измерений SEVIRI и данных термопрофилирующих буев // Исследование Земли из космоса. 2021. № 3. С. 30–44.

УДК 556.114:502

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ МАЛЫХ РЕК, ОТРАЖАЮЩИЙ ИНТЕНСИВНОСТЬ ГОРОДСКОЙ НАГРУЗКИ (НА ПРИМЕРЕ Г. СОЧИ)

Лесникова П.С., Захарихина Л.В.

Федеральный исследовательский центр

«Субтропический научный центр Российской академии наук»,

Сочи, Россия, lesnikovaps@yandex.ru

Аннотация. Выявлены особенности различия катионно-анионного состава малых рек г. Сочи, обусловленные разной интенсивностью техногенной нагрузки, которая определяется удаленностью городской застройки от русел рек. Для количественной оценки антропогенного влияния авторами предложен коэффициент интенсивности городской нагрузки, который учитывает поступление техногенного кальция в результате городского пыления и строительных работ, и позволяет выделить зоны с низким, средним и высоким уровнем воздействия.

Ключевые слова: гидрохимия, малые реки, Черноморское побережье Кавказа

Установление закономерностей совместного воздействия природных условий и антропогенной деятельности на гидрохимию рек представляет собой комплексную задачу, имеющую как фундаментальное значение для понимания процессов миграции элементов, так и прикладную ценность для экологического мониторинга и нормирования.

Изучен состав рек Мацеста, Западная Хоста, Хоста, Кудепста и Бзугу, впадающих в Черное море в Хостинском районе г. Сочи. Густонаселенные районы города сосредоточены в их нижнем течении. В верхнем течении долины рек, за исключением Бзугу, расположены на территории Сочинского национального парка.

Долины исследуемых рек преимущественно развиты в карбонатных осадочных породах различного возраста, толщи которых характеризуются неравномерным переслаиванием и чередованием. В верховьях рек Мацеста и Западная Хоста развит ареал юрских аргиллитов. На территории исследований развиты различные типы минерализации и оруденения (Государственная..., 2002).

Отбор проб проведен в зимнюю межень 2023 года. Содержания главных ионов определяли традиционными аналитическими методами.

Для исследуемых рек в период межени выделено три типа вод: $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$. Во всех случаях доминируют гидрокарбонаты и кальций, однако в зонах активной застройки возрастает доля сульфатов и хлоридов, а также увеличивается минерализация.

Отмечено, что в условиях городской нагрузки происходят процессы физико-химического подщелачивания почв и поверхностных вод (Герасимова и др., 2003). Важным фактором в городских условиях является повышенное поступление пыли, состав которой определяется потоками автотранспорта, топливного и промышленного производства, развитого в городе. Пыль привносится и с минеральным материалом, поступающим при строительных земляных работах из глубоких почвенных горизонтов и раздробленных горных пород, которые также обогащены Ca^{2+} , особенно в изучаемом нами регионе с широким распространением карбонатных пород (Захарихина, Буртовой, 2020).

В работе (Лесникова, Захарихина, 2023) установлено, что существенный рост содержаний Ca^{2+} в нижнем течении р. Мацеста и на всем протяжении р. Бзугу обусловлен совместным влиянием естественного фактора (ареал карбонатных пород) и подщелачивания вод за счет обогащения их техногенным Ca^{2+} .

С привлечением ранее полученных данных (Лесникова, Захарихина, 2023) проведена оценка поступления техногенного Ca^{2+} в воды малых рек Сочинского Причерноморья в межень и предложен коэффициент интенсивности городской нагрузки ($K_{ГН}$):

$$K_{ГН} = \frac{C_{ГН}}{C_{фон}},$$

где $C_{ГН}$ – содержание Ca^{2+} в речных водах в зоне с активной городской нагрузкой; $C_{фон}$ – содержание Ca^{2+} в речных водах развитых в ареале карбонатных пород и не подверженных городской нагрузке.

Ввиду схожести водосборных бассейнов рек и их приуроченности к единому литологическому комплексу карбонатных пород для расчета средних фоновых значений ($C_{фон}$) использованы данные содержаний ионов в реках Мацеста (Лесникова, Захарихина, 2023), Хоста, Кудепста. Из расчета $C_{фон}$ были исключены: речные воды, формирующиеся в ареале аргиллитов (верховья р. Западная Хоста), а также воды р. Бзугу, подверженные активной городской нагрузке от истока до устья (Лесникова, Захарихина, 2023). Кроме того, при выделении фоновых зон и зон различной степени интенсивности городской нагрузки было учтено воздействие природных факторов – моря и минеральных источников.

По результатам вычислений интенсивность городской нагрузки характеризуется следующими значениями $K_{ГН}$: низкая 1,0-1,5; средняя 1,5-2,0; высокая >2 .

Долины рек Хоста и Кудепста в нижнем течении характеризуются низкой интенсивностью городской нагрузки, а их воды в верхнем и среднем течении относятся к фоновым. Для Мацесты выявлен постепенный рост нагрузки – от низкой в среднем течении до средней в приустьевой зоне. Река Бзугу испытывает высокую антропогенную нагрузку на всем протяжении, без участков с фоновыми или пониженными значениями $K_{ГН}$.

Расчет $K_{ГН}$ для более крупных водотоков региона – Сочи и Мзымты (Лесникова, 2023, 2024), не дает контрастных значений из-за их больших водосборов и водности, что не позволяет достоверно оценить поступление техногенного Ca^{2+} . Наиболее ярко и информативно этот показатель будет проявляться в водах малых рек.

Благодарности: Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СЦ РАН FGRW-2024-0004, № госрегистрации 124022000094-8.

Список литературы:

- Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1: 200 000. Серия Кавказская. Лист К-37-V. Изд. 2-е / отв. ред. Н.И. Пруцкий. СПб.: ВСЕГЕИ, 2002.
- Захарихина Л.В., Буртовой А.В. Антропогенная эволюция желтоземов санаторной зоны г. Сочи // Почвоведение. 2020. № 6. С. 751–761.
- Лесникова П.С. Изменение макроэлементного состава речных вод в контрастных геологических условиях, река Сочи Черноморского побережья России // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 3. С. 47–56.
- Лесникова П.С. Формирование макроэлементного состава вод реки Мзымты в разные фазы водного режима при смене горных пород от аргиллитов до мергелей (Черноморское побережье России) // Изв. СЦ РАН. 2024. № 4–3. С. 117–129.
- Лесникова П.С., Захарихина Л.В. Взаимозависимое влияние естественного (горные породы) и техногенного (городская нагрузка) факторов на состав речных вод // Изв. СЦ РАН. 2023. № 3–1. С. 123–133.

УДК 504.054; 574.583; 582.26

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА

Разумовский Л.В., Кушнарева Т.Н.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, *lazy-lion@mail.ru*

Аннотация. Работа посвящена оценке практического применения новой концепции комплексного мониторинга. Теоретическая новизна концепции состоит в совместном анализе фитопланктонных комплексов из водохранилищ и диатомовых комплексов из колонок донных отложений. Полученные результаты позволяют оценить долговременные трансформации экосистем водохранилищ с момента их создания.

Ключевые слова: комплексный мониторинг, фитопланктон, диатомовые водоросли, донные отложения

Проблема оценки долговременных изменений качества водохранилищных вод является одним из приоритетных направлений гидрологических исследований. Данная работа посвящена оценке результатов практического применения новой концепции комплексного мониторинга (НККМ). Теоретическая новизна концепции состоит в совместном анализе диатомовых комплексов из колонок донных отложений и современных фитопланктонных комплексов. Целью проведенных исследований является формирование непрерывных рядов наблюдений за процессами осадконакопления на акватории водохранилищ с момента их создания.

Причиной проведенных исследований была необходимость поиска на акватории водохранилища зон устойчивой седиментации. Представленные исследования проводились в рамках определения наиболее полных и ненарушенных разрезов донных отложений, сформировавшихся на акватории водохранилищ.

Ранее, в 2017–2019 гг. была сформулирована НККМ (Razumovsky, 2020). Она подразумевала привлечение палеолимонологических методов при изучении донных отложений, сформировавшихся в водохранилищах за время их существования. Предполагалось, что в водохранилищах, которые образованы 75–85 лет назад, эти отложения достигли достаточной мощности. Их послойный анализ даст возможность проследить долговременные изменения в экосистеме водохранилища при анализе микрофоссилий сохранившихся в осадках.

Однако, при проведении работ на Иваньковском водохранилище было установлено, что все отобранные колонки донных отложений (ДО) не имеют достаточной мощности и время их формирования ограничивается последними 20–30 годами его существования (Разумовский и др., 2023). Был предложен новый алгоритм поиска зон устойчивой седиментации, где осадки непрерывно формировались с момента образования водохранилища. Предлагался поиск озер, которые существовали до создания водохранилища и были затоплены при образовании его акватории. К таким перспективным районам был отнесен участок акватории водохранилища, где ранее существовало озеро Видогощь.

Пробы отбирались в июле 2022 г., с моторного катера, ударной колонкой ГОИН, в центральной части Видогощинского залива (56.70514; 36.368207), который образовался при затоплении оз. Видогощь водами Иваньковского водохранилища в 1937 г. Отбор проб осуществлялся в месторасположении максимальных глубин (19.2 м). В результате была отобрана колонка донных отложений (ДО). Длина колонки ДО составила 94 см.

Во всех проанализированных диатомовых комплексах были установлены процентные соотношения между тремя экологическими группами диатомовых водорослей: планктоном, бентосом и эпифитами (рис. 1).

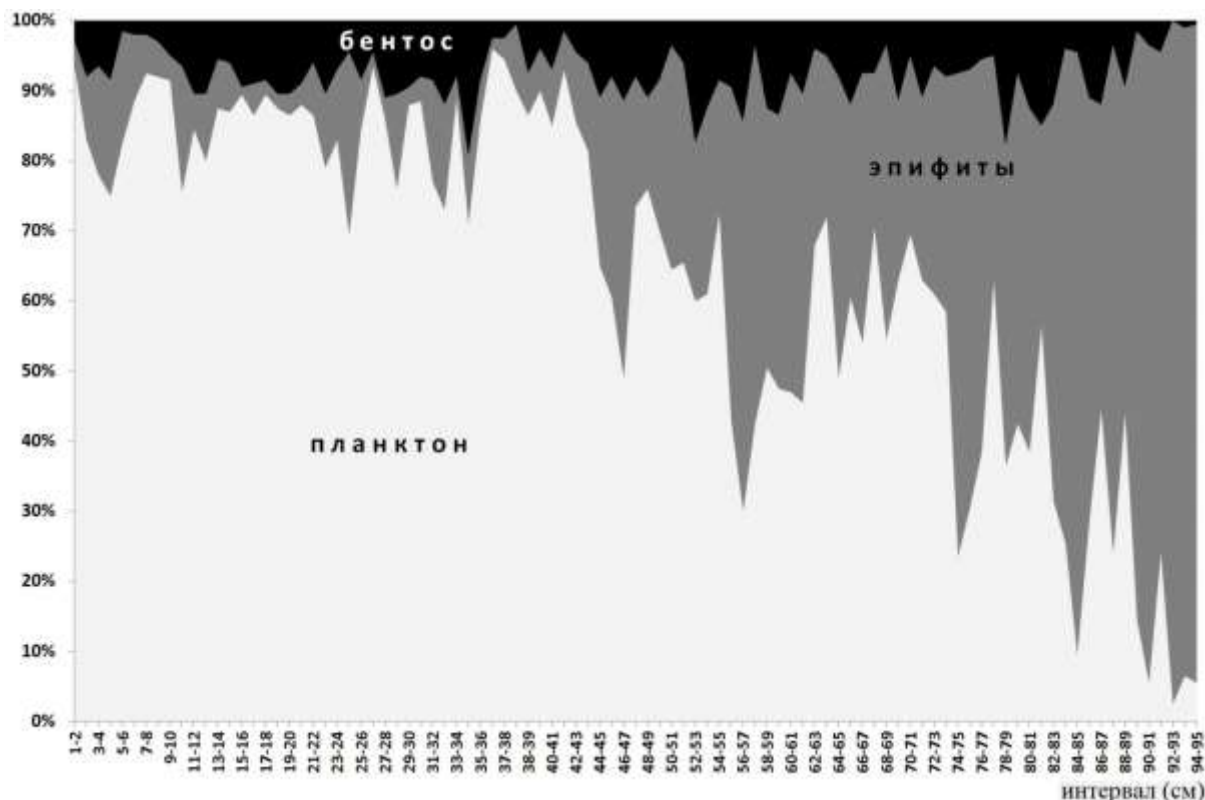


Рис. 1. Экологические пропорции в диатомовых комплексах из колонки ДО

В нижней части разреза, который соответствует времени существования озера Видогощь, до его затопления доминируют виды диатомовых водорослей, принадлежащие к группе эпифитов.

Напротив, верхней части разреза, который соответствует современным условиям существования, доминирующую группу диатомовых водорослей входят преимущественно планктонные формы (рис. 1).

Смена доминирующих групп отмечена в интервале 68-76 см., который соответствует времени затопления озера Видогощь водами образованного Иваньковского водохранилища.

Бентосные формы диатомовых водорослей характеризуются достаточно стабильной численностью. Их средняя численность составляет приблизительно 7 %. Это отмечено вне зависимости от того, доминирует ли эпифитная группа диатомей или сменившие ее представители планктона.

Интервал, где начинают доминировать планктонные формы, а эпифитные формы утрачивают доминирующее положение, совпадает с интервалом перехода тонкослоистых озерных отложений в однотонные отложения водохранилищного генезиса. Исходя из всех полученных результатов, темпы осадконакопления на акватории водохранилища: 0.88–1.0 см/год.

В результате проведенных исследований было установлено, что для получения полного и ненарушенного разреза водохранилищных отложений наиболее перспективным является отбор колонок ДО в районе озер, затопленных при образовании водохранилища.

Отсутствие процессов переотложения и переноса осадков в центральной части затопленных озер можно доказательно подтвердить ранее разработанным методом графического анализа таксономических пропорций в диатомовых комплексах (Разумовский, Моисеенко, 2009).

Изменение пропорций между различными экологическими группами диатомовых водорослей и начало доминирования планктонных форм совпадает с интервалом, где озерные осадки сменяются осадками, сформировавшимися в условиях созданного водохранилища.

Работа выполнена в рамках госзадания ИВП РАН № FMWZ-2025-0002.

Список литературы:

Разумовский Л.В., Кушнарева Т.Н., Разумовский В.Л., Анисимова А.В. Реконструкция долговременных изменений в двух верхневолжских водохранилищах по результатам комплексного анализа донных отложений // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 885–898.

Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // Доклады академии наук. Общая биология. Т. 429. № 3, 2009. С. 274–277.

Razumovsky L.V. Application of paleolimnological methods in study of ecosystem transformations in reservoirs // Limnology and Freshwater Biology (Special issue PaleoEurasia – 2020). 2020. No. 4: (SI PALO 2020) pp. 474–475. DOI:10.31951/2658-3518-2020-A-4-474

УДК 504.455; 519.688; 528.88

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расулова А.М., Кондратьев С.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии", Санкт-Петербургский филиал (ГосНИОРХ им. Л.С. Берга), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
rasulova@niorh.vniro.ru

Аннотация. Цель исследования: разработка методики дистанционной оценки трофического статуса экосистем озер с использованием математических моделей и спутниковых данных. Объектами исследования являются озерные экосистемы Восточной Финляндии. Анализ полученных результатов показал удовлетворительное соответствие рассчитанных и измеренных значений концентраций общего фосфора в озерах и их трофического статуса.

Ключевые слова: трофический статус, дистанционное зондирование, дешифрирование, водосбор, математическое моделирование, биогенная нагрузка, модель Фолленвайдера

Эвтрофирование – естественный или антропогенно ускоренный процесс повышения продуктивности водоема из-за поступления биогенных элементов, прежде всего азота и фосфора. Антропогенная нагрузка значительно ускоряет этот процесс, приводя к дисбалансу экосистемы, «цветению» воды, дефициту кислорода и снижению биоразнообразия. Для деэвтрофирования водоема требуются существенные изменения морфометрии или проточности.

Цель работы – разработка методики дистанционной оценки трофического статуса малых и средних озер бореальной зоны на основе методов математического моделирования, данных дистанционного зондирования подстилающей поверхности и геостатистических зависимостей между морфометрическими характеристиками водоемов.

Объектами настоящего исследования являются озера Восточной Финляндии в пределах Российской Федерации. Большинство озерных котловин этой территории имеют ледниковое происхождение, вытянуты в длину и имеют ориентацию с северо-запада на юго-восток. Их глубины небольшие и редко превышают 5–10 м (Измайлова, 2020).

Общая схема дистанционной оценки экологического состояния водного объекта и его трофического статуса с использованием дистанционных методов имеет вид:

1. Дешифрирование водного объекта по спутниковым снимкам (определение координат, площади акватории и типов подстилающей поверхности водосбора).
2. Оценка средней глубины озера по его площади на основе геостатистических взаимосвязей между морфометрическими характеристиками однородной группы водных объектов по глобальным базам данных (WORDLAKE, HydroLAKES) при отсутствии натурных данных.
3. Расчет биогенной нагрузки с водосбора (от рассредоточенных источников, атмосферных выпадений и точечных сбросов) по модели, учитывающей сток и типы землепользования с учетом гидрологических характеристик территории (стока).
4. Расчет среднегодовой концентрации общего фосфора в озере с использованием модели Фолленвайдера (Хендерсон-Селлерс, 1987), связывающей фосфорную нагрузку с морфометрией и проточностью водоема. Определение трофического статуса (олиготрофный, мезотрофный, эвтрофный, гиперэвтрофный) на основе существующих градаций.

На вход модели подаются: растры с цифровой моделью рельефа (ASTER DEM), предполагаемая точка стока, мультиспектральные снимки исследуемой территории. Для

идентификации типов подстилающей поверхности в настоящем исследовании используется набор данных Dynamic World.

Разработанная в рамках данного исследования модель представляет собой целостный автоматизированный алгоритм в среде QGIS (с подключением по API Google Earth Engine), сочетающий в себе гидрологический анализ и методы дешифрирования подстилающей поверхности в единую схему.

В качестве тестовых объектов выбраны два озера ледникового происхождения – Уксуярви (61°52.2′ с.ш., 31°38.9′ в.д.) и Шапшозеро (61°35.6′ с.ш., 34°09.6′ в.д.), с известными морфометрическими и гидрохимическими характеристиками.

Расчетные площади водосборов по ЦМР оказались на 15–20% и составляют примерно 420 км² – для Уксуярви и 17 км² – для Шапшозера. Можно предположить, что это связано с антропогенными изменениями на водосборе, произошедшими с момента оценки площади, указанной в литературных данных (Озера Карелии, 2013). Дешифрирование подстилающей поверхности показало, что больше 80% площади водосборов занято лесами. На сельскохозяйственные и селитебные территории приходится около 1% площади.

Фосфорная нагрузка на оз. Уксуярви, согласно расчетам, составила ~800 т/год, Шапшозера – 400 т/год, что, вероятно, связано с наличием на водосборе Уксуярви форелевого хозяйства. Концентрация общего фосфора по модели составила 5.2 и 31 мг/л для Уксуярви и Шапшозера, соответственно. Данные значения близки к указанным в (Озера Карелии, 2013). Таким образом, оз. Уксуярви можно отнести к олиготрофному типу, а Шапшозеро – к мезотрофному. Анализ полученных результатов показал удовлетворительное соответствие рассчитанных и измеренных средних значений концентраций общего фосфора в озерах и их трофического статуса.

Список литературы:

Измайлова А.В. Озерный фонд Арктической зоны Российской Федерации // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития / МГО 2020 имени Л. Н. Карлина: труды IV Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2020 года. Санкт-Петербург: Химиздат, 2020. С. 181–184.

Озера Карелии: Справочник / под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 218–219.

Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 336 с.

УДК 574.5

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
ДИНАМИКИ СОДЕРЖАНИЯ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА, ПЕРВИЧНОЙ
ПРОДУКЦИИ И ДЕСТРУКЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В
КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ**

Рахуба А.В.

Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского
бассейна РАН, *rahavum@mail.ru*

Аннотация. По данным экспедиционных наблюдений и данным математического моделирования рассмотрены особенности пространственно-временного распределения первичной продукции и деструкции органического вещества в Куйбышевском водохранилище. На основе численных экспериментов исследована конвекция поля температуры, динамика растворенного в воде кислорода. Выявлены разномасштабные зоны акватории с различным прогревом водной толщи и содержанием кислорода.

Ключевые слова: Куйбышевское водохранилище, гидрохимический и термический режим, растворенный в воде кислород, фитопланктон, первичная продукция, деструкция, математическое моделирование.

Потепление климата и изменение интенсивности водообмена на водохранилищах приводит к повышению температуры воды, замедлению стоковых течений, массовому развитию фитопланктона и повышению первичной продукции органического вещества. В результате, в водоемах формируется баланс органических веществ, с которым тесно связаны балансы биогенных и других элементов (Алимов и др., 2013; Минеева, 2009). От этого зависит экологическое состояние водной экосистемы и биологическая продуктивность, включающая все этапы продукционного процесса в водоеме (Алимов и др., 2013; Винберг, 1960).

На Куйбышевском водохранилище наблюдения за динамикой течений, гидрохимическим режимом, развитием фитопланктона, первичной продукцией и деструкцией органического вещества проводятся с 1957 г. (Номоконова, Паутова, 2013; Минеева, 2009; Рахуба, Тихонова, 2016; Салманов, Сорокин, 1962; Экология...1989), а в последние время для решения экологических задач активно стали применяться методы математического моделирования (Пуклаков, Даценко, 2021; Рахуба, 2023; Рахуба, 2025а, б). В данной работе представлены результаты модельных расчетов, цель которых оценить некоторые трофические характеристики Куйбышевского водохранилища в летний период жаркого 2016 г. Кроме того, на основе разработанной плановой 2D математической модели ставилась задача рассчитать сезонный термический и кислородный режимы водохранилища, пространственно-временную динамику первичной продукции и деструкции органического вещества.

Численная модель Куйбышевского водохранилища разработана и реализованная в программном комплексе «ВОЛНА» (Рахуба, 2023; Рахуба, 2025а, б). Расчеты сезонной пространственно-временной динамики температуры воды (T), растворенного в воде кислорода (O_2), первичной продукции (A) и деструкции (D) органического вещества в Куйбышевском водохранилище выполнены на 2D модели с прямоугольной сеткой 200×200 метров (146926 узлов) для вегетационного сезона 2016 г., одного из жарких за последние десятилетие. Модельный расчет осредненной по всей акватории водохранилища температуры воды летом составил 22.7°C, что оказалось на 2.2°C выше нормы (20.5°C) за весь предыдущий исторический период существования водоема (1957–1980 гг.)

Прогрев и охлаждение Куйбышевского водохранилища идут с разной интенсивностью на различных участках, начиная с мелководных в верхней северной части и заканчивая приплотинным участком на юге водохранилища. Согласно модельным расчетам, диапазон колебаний температуры воды весной составляет 16.2–22.1°C, летом – 22.7–29.5°C, осенью – 12.1–22.3°C, а коэффициент пространственной неоднородности (C_v) соответственно – 12%,

10% и 29%. В мелководных заливах летом температура воды достигает 29.5°C, на речных участках и глубоководных плесах – 22-23°C (рис. 1а).

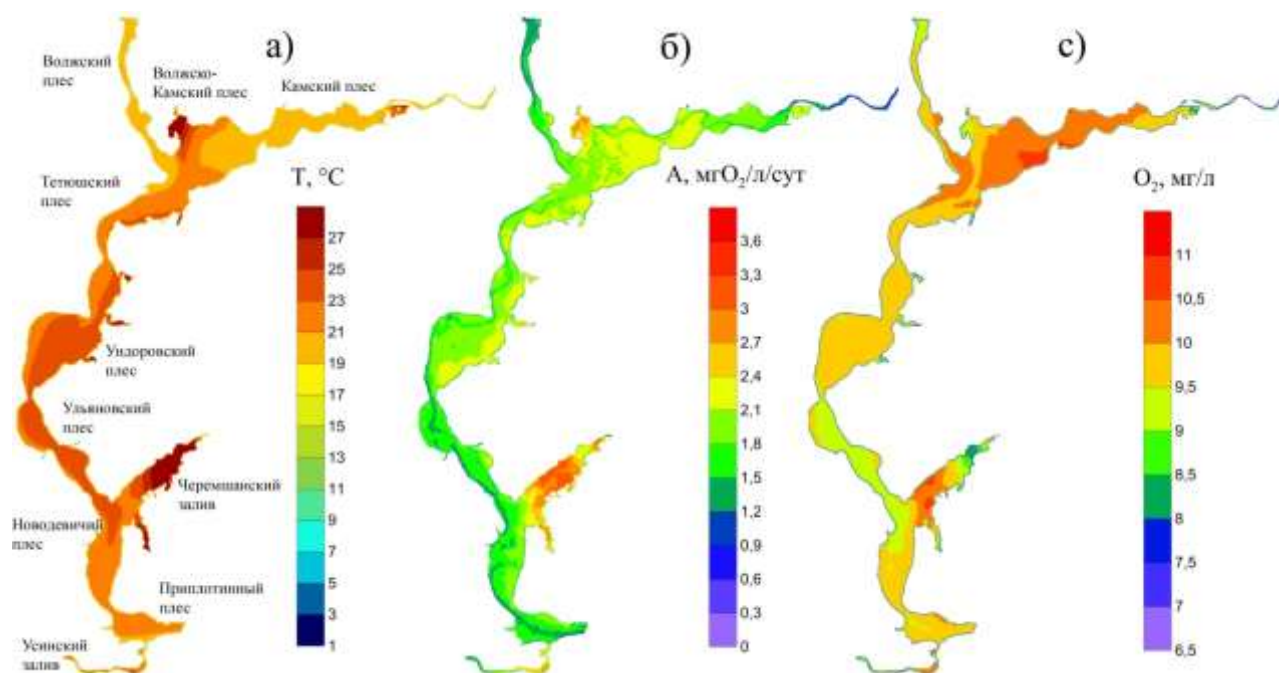


Рис. 1. Модельный расчет пространственного распределения температуры воды (а), первичной продукции (б) и растворенного в воде кислорода (с) в Куйбышевском водохранилище в летний период 2016 г.

Характер динамики прогрева акватории Куйбышевского водохранилища формирует условия для развития фитопланктона и пространственного распределения первичной продукции в водной толще. Расчеты показывают, что весной значения A колеблется от 0.12 до 0.51 гO₂/м³/сут, а пространственная неоднородность составляет 19%. В период максимального прогрева воды летом и интенсивного развития фитопланктона в мелководных районах плесов и заливах водохранилища A достигает 1.9-3.6 гO₂/м³/сут, а в нижней приплотинной части водохранилища – 1.3–1.6 гO₂/м³/сут (рис. 1б). Пространственная неоднородность A летом не превышает 21%. Осенью, с охлаждением водохранилища и уменьшением биомассы фитопланктона первичная продукция также снижается. При этом в заливах еще остается много фитопланктона и поддерживается высокий уровень продуцирования, равного 2.9 гO₂/м³/сут. Наименьшая осенняя A отмечается на речных участках Волжской и Камской ветках, а также вдоль глубоководной части водохранилища, направленной к замыкающему Приплотинному плесу, и составляет 0.43 гO₂/м³/сут. Неоднородность распределения A осенью равна 34%.

Сезонные изменения деструкции в Куйбышевском водохранилище хорошо коррелируют с изменениями первичной продукции, что свидетельствует о преобладании в биотическом круговороте автохтонного органического вещества. Модельные расчеты показывают, что самые высокие средние значения деструкции приходятся на период интенсивного «цветения» водохранилища – 0.45–0.81 гO₂/м³/сут (табл. 1). Соотношение A/R в Куйбышевском водохранилище на протяжении всего вегетационного периода больше единицы, что указывает на автотрофный характер внутриводоемных процессов. Исключение составляют лишь ранняя весна и поздняя осень, когда R больше A . В период летнего прогрева первичная продукция в разы превышает деструкцию органического вещества.

Изменение концентрации O₂ в экосистеме Куйбышевского водохранилища существенно зависит от сезонного хода температуры воды, интенсивности продукционно-

Таблица 1. Натурные данные и модельные расчеты продукционно-деструкционных характеристик Куйбышевского водохранилища в летний период.

Плеса	Глубина, м	T, °C		A, мгO ₂ /л		R, мгO ₂ /л		O ₂ , мг/л	
		Наблюдение	Моделирование	Наблюдение	Моделирование	Наблюдение	Моделирование	Наблюдение	Моделирование
Волжский	6.4	22.1	21.1	0.48	0.59	0.47	0.45	7.13	8.00
Камский	4.6	23.4	20.8	1.56	1.25	0.90	0.58	8.40	8.32
Волжско-Камский	5.5	23.1	22.4	1.93	1.94	0.62	0.57	8.26	9.57
Тетюшский	7.3	23.0	22.7	1.32	1.42	0.68	0.58	7.93	9.48
Ундоровский	7.7	23.1	23.4	1.63	1.76	0.94	0.72	9.81	9.79
Ульяновский	13.6	22.5	23.4	1.73	1.44	1.28	0.68	10.05	9.68
Новодевичий	9.3	23.3	23.3	2.05	1.94	1.76	0.81	10.99	10.01
Приплотинный	14.5	22.9	21.9	0.60	1.00	1.22	0.73	10.23	10.12

деструкционных процессов в толще воды, величины газообмена на границе с атмосферой и поглощения O₂ донными отложениями вследствие окисления детрита микроорганизмами. За рассматриваемый расчетный сезон 2016 г. среднее по глубине насыщение O₂ в водохранилище варьировало от 89 % до 130 %. В весенний период, следуя за прогревом водной массы водохранилища, концентрация O₂ плавно снижается с 11.02 мгO₂/л до 9.22 гO₂/м³ к лету. Далее в период массового цветения фитопланктона начинается постепенный рост концентрации O₂ в воде (рис. 1с), который продолжается по мере охлаждения водохранилища в осенний период и на мелководье достигает 13.64 гO₂/м³. Величина пространственной неоднородности содержания в воде O₂ весной составляет 4.0%, летом – 3.0% и осенью – 8.4%.

В табл. 1 представлены осредненные по глубине натурные данные и модельные расчеты температуры воды, первичной продукции, деструкции и растворенного в воде кислорода в восьми плесах Куйбышевского водохранилища в период максимального прогрева воды.

Модельные расчеты в этих районах водохранилища показывают, что весной продукционно-деструкционная активность не высока, а среднее по глубине насыщение O₂ в воде колеблется в пределах 90–98 %. Пополнение кислорода в водной толще в основном происходит из атмосферы (0.130–0.375 гO₂/м³/сут). Летом выделение O₂ фитопланктоном в процессе фотосинтеза возрастает в 8 раз, а деструкция – в 4 раза. В результате на мелководных участках отмечается перенасыщение кислорода 115–129%, а на глубоководных участках насыщение остается в пределах 90–108%. В этот период избыточный кислород выделяется из водоема в атмосферу в количестве 0.519–1.666 гO₂/м³/сут. Осенью продукционно-деструкционные процессы снижаются, и насыщение кислорода в воде падает до 98–112%. Поступление O₂ в атмосферу также снижается до 0.081–1.058 гO₂/м³/сут. Потребление O₂ донными отложениями в расчетах определялось на основе экспериментально полученных данных на разных участках Куйбышевского водохранилища и варьировало в пределах 1–3 гO₂/м³/сут донной поверхности, что в единицах потока составило 0.120–0.420 гO₂/м³/сут. Вклад фотосинтеза фитопланктона в общий баланс кислорода Куйбышевского водохранилища многократно превышает газообмен с атмосферой и деструкционные процессы в толще воды и на дне.

Данные расчетов на пространственной 2D модели показывают, что в период максимального прогрева воды на водохранилище интенсивное развитие фитопланктона наблюдается в центральных и приплотинных плесах водохранилища, тогда как верхняя

русловая часть Волжской и Камской веток переменного подпора характеризуются низкой биомассой фитопланктона, первичной продукцией и деструкцией органического вещества. Соотношение средних по глубине первичной продукции и деструкции в Куйбышевском водохранилище больше единицы, что указывает на автотрофный характер внутриводоемных процессов.

Список литературы:

- Алимов А.Ф., Богатов В.В., Голубков С.М. Продукционная гидробиология. СПб.: Наука, 2013. 342 с.
- Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в Водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2009. 279 с.
- Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
- Номоконова В.И., Паутова В.Н. Первичная продукция фитопланктона в Куйбышевском и Саратовском водохранилищах в летние сезоны 2009–2011 гг. // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 3. С. 185–193.
- Пуклаков В.В., Даценко Ю.С. Оценка влияния Нижнекамского гидроузла на экологическое состояние Куйбышевского водохранилища // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Пермь, 2021. С. 344–348.
- Рахуба А. В. Математическое моделирование термического режима и динамики растворенного кислорода в Куйбышевском водохранилище // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2025. № 2. С. 102–109. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2025/2/102-109
- Рахуба А.В. Моделирование цветения воды в Куйбышевском водохранилище в годы с различным режимом регулирования стока // Географический вестник = Geographical bulletin, 2023. № 2(65). С. 92–104. DOI: 10.17072/2079-7877-2023-2-92-104
- Рахуба А. В. Мониторинг и математическое моделирование динамики распределения некоторых трофических характеристик в Куйбышевском водохранилище // Известия Самарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 4(2). С. 356–364. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4(2)-356-364
- Рахуба А.В., Тихонова Л.Г. Оценка пространственно-временного распределения трофических характеристик Куйбышевского водохранилища // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 5(2). С. 349–355.
- Салманов М.А., Сорокин Ю.И. Первичная продукция Куйбышевского водохранилища // Изв. АН СССР. Сер. Биол. 1962. № 4. С. 603–613.
- Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Л.: Наука, 1989. 304 с.

УДК 556.114.6

ВЛИЯНИЕ НЕОВУЛКАНИЧЕСКИХ ЦЕНТРОВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД

Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Реутова Н.В.

Центр географических исследований КБНЦ РАН, Нальчик, Россия, reuttat@yandex.ru

Аннотация. С целью выявления возможного влияния потенциально активных Эльбрусского и Казбекского вулканических центров на содержание главных ионов и микропримесей в природных водах проведены исследования в высокогорной зоне от бассейна р. Кубани до р. Терек. Многие водотоки в непосредственной близости от них имеют состав, нехарактерный для водных объектов высокогорий. Обогащение вод Al, As, Li, F, Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ выражено в разной степени, но контрастирует с водными объектами, удаленными от вулканических центров. Концентрации потенциально токсичных элементов As и Li во многих водных объектах, включая используемые для питья, в зоне влияния обоих вулканических центров и вулкана Тепли превышают ПДК_{пит.}, в некоторых содержится >10ПДК.

Ключевые слова: вулканические центры, Эльбрус, Казбек, поверхностные воды, распределение микропримесей и главных ионов

На территории Центрального Кавказа находятся две обширные неовулканические области, включающие множество вулканических аппаратов и интрузий, лавовых и туфовых покровов (Лебедев, Вашакидзе, 2014). В настоящее время потенциально активными считаются 2 вулканических центра (ВЦ) Эльбрусский (Чернышев, Бубнов и др., 2014) и Казбекский (Лебедев, Парфенов и др., 2014). Вопрос о возможном влиянии на химический состав поверхностных вод этих «спящих» вулканов, расположенных в густонаселенных и активно осваиваемых районах, имеет немаловажное научное и прикладное значение. В связи с этим был проведен сравнительный анализ концентраций широкого круга микропримесей (Ag, As, Cu, F, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Zn) и главных ионов (K⁺, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻) в водных объектах высокогорной зоны. Полевые исследования проводили в период 2016-2025 г.г. в бассейнах основных горных рек на Северном Кавказе в его центральном секторе. Изучали химический состав вод в верхних частях каждого бассейна основных рек, в т.ч. и в верховьях притоков, впадающих в основные в нижележащих зонах, всего обследовано около 350 водных объектов: многоводных ледниковых и неледниковых малых рек и родников.

В районе Эльбрусского ВЦ находятся истоки рек Кубань, Малка, Баксан. Водосборная площадь правых притоков Кубани и левых притоков Баксана до 35-40 км от их истоков занимает западный и южный склоны Эльбруса соответственно, на северном склоне зона истока Малки. В районе Казбекского ВЦ находятся истоки Терека и его приток второго порядка Геналдон, впадающий в Гизельдон с правого берега. Между двумя ВЦ находятся бассейны Чегема, Череха, Уруха и Ардона. На водосборе р. Ардон в правобережной его части находится молодой, но в настоящее время неактивный вулкан Тепли. С его южного склона берут начало такие притоки Ардона, как Лядон (ЮЗ) и Фиагдон/Бугультадон (ЮВ), Закка (Ю), с северного – р. Архондон.

Сравнение диапазонов концентраций в бассейне каждой реки, в том числе, отдельно для правой и левой части бассейна и водотоков ледникового и неледникового происхождения, свидетельствующее о контрастности распределения, а также пространственный анализ, выполненный с использованием ГИС (расположение водных объектов с повышенным, высоким и сверхвысоким содержанием), показали, что пространственное распределение некоторых компонентов действительно отражает их связь с вулканическими центрами, для других связь не прослеживается. Свидетельством являются их высокие концентрации в водных объектах в непосредственной близости от неовулканических центров и иных проявлений четвертичного вулканизма, и особенности пространственного распределения, а

именно: резкий контраст между уровнем их содержания в водных объектах в правобережной и левобережной части Кубани и Баксана и на ограниченной территории урочища Джилысу и поляны Эммануэля в зоне формирования Малки по обоим берегам; значительные различия между смежными бассейнами рек Гизельдон и Геналдон, правыми и левыми притоками Геналдона.

Для Эльбрусского ВЦ характерны аномально высокие концентрации прежде всего As и Li, в несколько меньшей степени Cl⁻ и Na⁺, под наиболее активной в настоящее время восточной вершиной наблюдается дополнительная ассоциация с F и Mo, а повышение концентраций SO₄²⁻, достоверно связанное с вулканом, было обнаружено в двух многоводных ледниковых реках, берущих начало на массиве Кюкюртлю, являющемся остатком Палео-Эльбруса (Короновский, Мышенкова, 2016). Для Казбекского ВЦ характерно значительное повышение концентраций Li⁺, Na⁺, F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻ и Mn, но не As и Mo, в основном – в р. Геналдон. Большинство водных объектов, испытывающих наибольшее влияние четвертичного вулканизма, представляют собой водотоки неледникового происхождения на абсолютных высотах 2.5-3.0 тыс. м на склонах Эльбруса и Казбекско-Джигарайского поднятия. Исключение составляет ледниковая р. Геналдон, загрязненная от истока до устья. Контрастно обозначились ареалы с повышенным содержанием As и Mo в водотоках на южной стороне г. Тепли (Лядон, верховья Фиагдона). В верхней части бассейна р. Черек Безенгийский/Хуламский повышенное содержание As и F, по всей вероятности, тоже связано с интенсивными вулканическими процессами, происходившими здесь в более раннее время (Кайгородова, 2022).

По общему уровню содержания Cu и Zn различия в бассейнах разных рек мало выражены, так же, как и различия между водными объектами на разных сторонах бассейнов. Уровень концентраций и распределение Mn в общих чертах подобно Cu и Zn. Концентрации прочих определяемых компонентов (Ag, Mo, Ni, Pb, Sr) редко достигают 1-1.5 мкг/л, и в их распределении по территории не обнаружено закономерных тенденций. Варьирование концентраций Ca²⁺ и HCO₃⁻ не связано с влиянием вулканических центров.

Проведенные полевые исследования в высокогорной зоне между реками Кубань и Терек показали, что и в настоящее время «спящие» вулканы являются источником значительного природного загрязнения поверхностных и подземных вод, что следует учитывать при организации питьевого водоснабжения. В зоне влияния обоих вулканических центров и вулкана Тепли концентрации потенциально токсичных элементов As и Li во многих водных объектах, включая родники, используемые для питья, а также питьевые воды централизованного и нецентрализованного водоснабжения в Приэльбрусье (пос. Азау, Терскол, гостиницы и кафе на станциях канатной дороги, водовод в урочище Джилысу) превышают ПДК_{пит.}, в некоторых содержится >10 ПДК.

Список литературы:

- Кайгородова, Е. Н. Возраст, петролого-геохимические характеристики и происхождение магматических пород среднеюрского хуламского вулканоплутонического комплекса (Северный Кавказ) / Е. Н. Кайгородова, В. А. Лебедев // Вулканология и сейсмология. – 2022. – № 2. – С. 38-65. – DOI 10.31857/S0203030622020031. – EDN VIAQKW
- Короновский Н.В., Мышенкова М.С. Строение западного склона вулкана Эльбрус и Приэльбрусья // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 2. – С. 60-73.
- Лебедев В.А., Вашакидзе Г.Т. Четвертичные вулканы Большого Кавказа и их каталогизация на основе геохронологических, вулканологических и изотопно-геохимических данных // Вулканология и сейсмология. – 2014. – № 2. – с. 29-45. DOI: 10.7868/S0203030614020047
- Лебедев В.А., Парфенов А.В., Вашакидзе Г.Т., Чернышев И.В., Габарашвили К.А. Основные события в истории развития Казбекского неовулканического центра (Большой Кавказ):

изотопно-геохронологический данные // Доклады Академии наук. – 2014 – Т. 458. – № 1. – С. 67–73. DOI: 10.7868/S0869565214250197

Чернышев И.В., Бубнов С.Н., Лебедев В.А., Гольцман Ю.В., Баирова Э.Д., Якушев А.И. Два этапа эксплозивного вулканизма Приэльбрусья: геохронология, петрохимические и изотопно-геохимические характеристики вулканитов и их роль в неоген-четвертичной истории Большого Кавказа // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2014. – № 1(22). – с. 100-130.

УДК 504.064

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА (ПО ДАННЫМ ГОСУДАРСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА)

Решетняк О.С.¹, Решетняк В.Н.²

¹Институт наук о Земле ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия, osreshetnyak@sfedu.ru

²ОП «ВНИГРИуголь» АО «СНИИГГиМС», Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Представлены результаты комплексной оценки качества воды и состояния экосистем речных участков Кольского полуострова по комплексу гидрохимических и гидробиологических показателей на основе широко используемых в системе государственного мониторинга нормативных документов и методик. На основе комплексной оценки получено, что состояние участков рек Кольского полуострова характеризуется как «равновесное» (в 83% случаях в зонах тундры и лесотундры и в 71% случаях в зоне тайги).

Ключевые слова: состояние речных экосистем, качество воды, комплексная балльная оценка, гидрохимические и гидробиологические показатели

Введение в проблему

В современной научной литературе существует множество методических подходов к оценке качества воды и состояния водных экосистем, но чаще всего оценка проводится по отдельным параметрам или по комплексу показателей одной из компонент водной экосистемы (водная среда, донные отложения, гидробиоценоз). До сих пор ни в России, ни за рубежом нет экологически обоснованной интегральной методики для оценки качества воды и состояния водных экосистем по разным параметрам. Сложность разработки такой методики заключается, прежде всего, в правильности оценки влияния загрязняющих веществ на состояние водных сообществ и с установлением причинно-следственных связей трансформации качества воды и состояния экосистемы в целом. При использовании широкого комплекса показателей возникают трудности, связанные с анализом и систематизацией больших массивов данных. Поэтому в мировой практике широко используются обобщенные или комплексные показатели, с позиции экосистемного подхода оценку качества воды и состояния водных экосистем рекомендуют проводить с включением комплекса показателей (Решетняк, 2018, 2024).

В последние десятилетия в условиях антропогенного воздействия и возрастающей нагрузки наблюдается антропогенная трансформация не только химического состава и качества воды рек различных природных зон России, но и антропогенная трансформация и перестройка гидробиоценозов (Брызгалов и др., 2013; Никаноров и др., 2009, 2011а, 2011б). Для арктических рек такие процессы сопровождаются деградацией речных экосистем, усилением процессов экологического регресса на фоне климатических изменений (Решетняк, 2020), для южных рек – ухудшением качества воды на фоне резкого снижения водности. В таком контексте особенно важным становится разработка методических подходов к оценке состояния водных экосистем в условиях антропогенного воздействия, климатических изменений и возрастания темпов использования водных ресурсов.

Целью настоящей работы является комплексная оценка состояния речных экосистем Кольского полуострова на основе многолетних данных государственного мониторинга.

Материалы и методы исследования

Для любого оценочного исследования необходимыми элементами являются данные (многолетняя информация) и шкалы оценки (классификаторы и т.п.). Данные могут быть собраны из общедоступных источников, справочников, фондовых материалов или же получены на основе полевых и лабораторных исследований.

В настоящем исследовании использованы многолетние гидрохимические и гидробиологические данные системы государственного наблюдения Росгидромета. Более надежную информацию об экологическом состоянии водных экосистем и качестве воды, как

среды обитания гидробиоценозов, могут дать значения гидробиологических показателей, которые позволяют дать интегральную оценку влияния комплекса загрязняющих веществ и факторов на сообщества водных организмов (Решетняк, 2024).

В методику исследования включена схема комплексной оценки качества воды и состояния участков рек (рис. 1). Предлагается качество воды, как среды обитания гидробиоценозов, оценивать по гидрохимическим показателям на основе методических подходов, широко используемых в систем государственного мониторинга состояния и качества поверхностных вод (РД 52.24.643–2002¹⁵; Р 52.24.776–2012¹⁶ и др.); состояние водных экосистем – по гидробиологическим показателям согласно нормативным документам Росгидромета и ГОСТ 17.1.3.07-82; уровень загрязненности экосистемы в целом – по геохимическим и экотоксикологическим показателям (Решетняк, 2024). В зависимости от конкретных задач исследования и имеющихся данных перечень используемых показателей для комплексной оценки может варьироваться.



Обозначения на схеме: УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, ИС – индекс сапробности (по фито- или зоопланктону), БИ – биотический индекс (по макрозообентосу), ДО – донные отложения, ЗВ – загрязняющие вещества

Рис. 1. Концептуальная блок-схема комплексной оценки качества воды и состояния водной среды участка реки (или речного бассейна) (Решетняк, 2024)

При разработке алгоритма комплексной оценки качества воды и состояния речных участков использован принцип бальной оценки, применяемый в эколого-географических исследованиях. Все выбранные нами показатели являются типичными для большинства водных экосистем вне зависимости от их географического положения, и отражают эффект

¹⁵ РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. – СПб.: Гидрометеиздат, 2003. – 49 с.

¹⁶ Р 52.24. 776-2012. Рекомендации. Оценка антропогенной нагрузки и риска воздействия на устьевые области рек с учетом их региональных особенностей. Разработчики: А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов, Л.С. Косменко, О.С. Решетняк. – Ростов-на-Дону, Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2012. – 31 с.

воздействия неблагоприятных факторов на состояние гидробиоценозов. Все этапы оценки по отдельным показателям (гидрохимическим, гидробиологическим, геохимическим и токсикологическим) проводятся на основе единого подхода и при прочих равных условиях более напряженным в экологическом отношении будет считаться водная система, где отмечается более худшее качество воды по состоянию гидробиоценозов (Решетняк, 2024).

Для комплексной оценки качества воды и состояния экосистемы на участке реки необходимо провести балльную оценку по выбранным показателям (гидрохимическим, гидробиологическим, геохимическим и экотоксикологическим), каждому оценочному результату присвоить балл от 1 до 5, рассчитать средний балл и провести итоговую оценку качества воды и состояния участка реки по комплексу показателей. Более подробно алгоритм комплексной оценки (с описанием шкал оценки по отдельным показателям) представлен в работе (Решетняк, 2024). Если при оценке качества воды и состояния водных экосистем средний балл равен 2.5; 3.5 или 4.5, то состояния оценивается как переходное, например при 2.5 – переходное от «равновесного» в «напряженное».

Результаты исследования и их обсуждение

Для отдельных участков рек Кольского полуострова, расположенных в зонах тундры, лесотундры и северной тайги, проведена покомпонентная и комплексная оценка качества воды и состояния водной среды. Состояние речных экосистем по гидрохимическим показателям чаще всего характеризовалось как «естественное» (I-й класс качества). В «равновесном» состоянии (II-й класс качества) находятся участки рек Ковдор и Можжель, Ена и в переходном из «естественного» в «равновесное» – участки рек Печенга, Вите и Нива.

Состояние речных экосистем по гидробиологическим показателям в зонах тундры и лесотундры чаще всего характеризовалось как «напряженное» (3-й класс качества), а в зоне тайги – как «равновесное» или переходное из равновесного состояния (2-й класс качества). Такое различие обусловлено более суровыми природно-климатическими условиями функционирования гидробиоценозов в речных водах зон тундры и лесотундры. Здесь за счет низких температур воды, низкого содержания питательных веществ сформированы менее благоприятные условия для развития биоценозов, что и обуславливает усиление процессов экологического регресса (Никаноров и др., 2009; Решетняк, 2020).

Результаты комплексной оценки качества воды и состояния участков рек Кольского полуострова представлены на рис. 2. Состояние большинства участков рек по комплексу показателей характеризуется как «равновесное» (83% в зонах тундры и лесотундры и 71% в зоне тайги). С экологической точки зрения наиболее неблагоприятная ситуация сложилась на участках рек Можель и Ковдор в районе города Ковдор.

Выводы

По результатам проведенных комплексных исследований можно отметить, что состояние большинства участков рек Кольского полуострова характеризуется как «равновесное» в зонах тундры и лесотундры и в зоне тайги. Более четкая дифференциация речных участков выявлена по состоянию гидробиоценозов: в зоне тайги состояние характеризовалось как «равновесное», а в зонах тундры и лесотундры – как «напряженное», что обусловлено более суровыми природно-климатическими условиями. Полученные результаты имеют высокую практическую значимость и могут быть использованы при выявлении экологически неблагополучных участков, для прогноза изменения качества воды и обоснования необходимости водоохранных мероприятий.

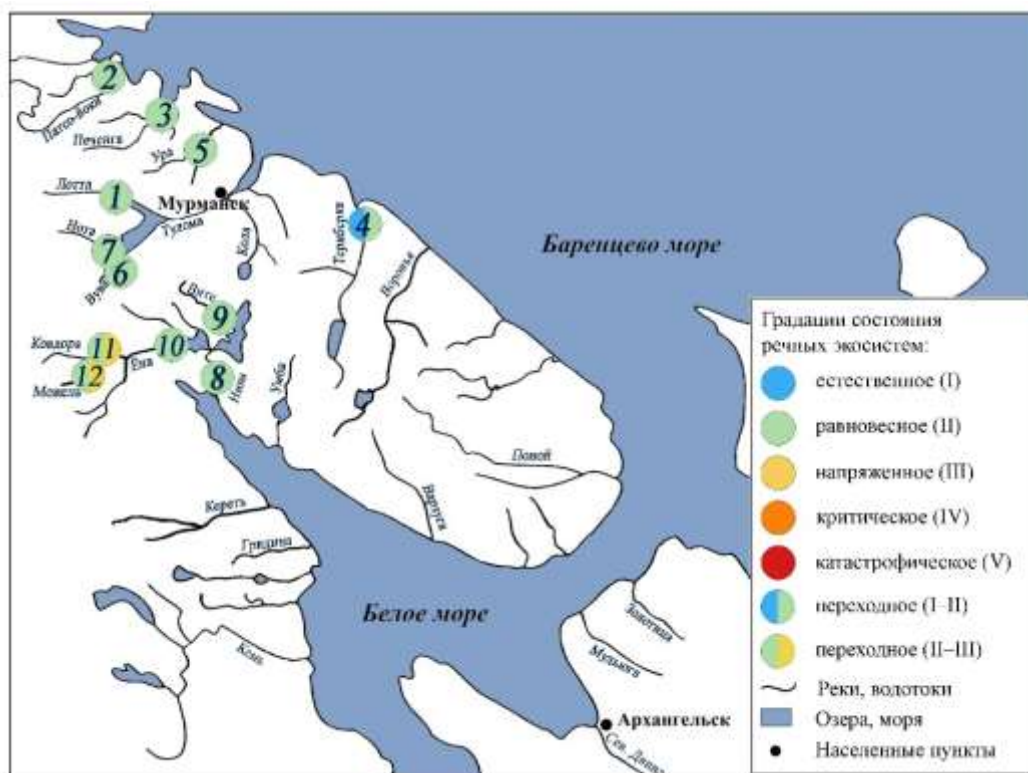


Рис. 2. Пространственная изменчивость качества воды и состояния участков рек Кольского полуострова по комплексу гидрохимических и гидробиологических показателей

Список литературы:

- Брызгалов В.А., Никаноров А.М., Решетняк О.С. Изменчивость экологического состояния речных зон устьевых экосистем крупных рек России // Вода: химия и экология. 2013. № 12. С. 15–21.
- Никаноров А.М., Соколова Л.П., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Оценка состояния гидробиоценоза на участках водных объектов Кольского Севера с высокой степенью загрязненности воды соединениями меди и никеля // Метеор. и гидрол. 2009. № 11. С. 69–80.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Антропогенная трансформация компонентного состава водной среды устьевой области р. Лены // Водные ресурсы. 2011 а. Т. 38. № 2. С. 181–192.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Антропогенная трансформация структурной организации гидробиоценоза устьевой области р. Лены // Водные ресурсы, 2011 б. Том 38. № 3. С. 306–314.
- Решетняк О. С. Пространственно-временные закономерности трансформации химического состава и качества речных вод европейской части России: дисс. ... докт. геогр. наук: 1.6.21. Геоэкология. Ростов-на-Дону, 2024. 368 с.
- Решетняк О.С. Экосистемный подход к оценке состояния водных объектов (на примере малых рек юга России) // Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, г. Сочи, 08-14 октября 2018 г. В 2-х томах. Том II. Новочеркасск: Лик, 2018. С. 224–230.
- Решетняк, О.С. Оценка уровня экологического риска в речных экосистемах арктической зоны России // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 3. С. 69–78.

УДК 556.5

**РАЗРАБОТКА АЗОТНОГО БЛОКА ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНОГО
СТОКА И КАЧЕСТВА ВОДЫ ECOMAG-N**

Фащевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г., Вишневская И.А.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, *tf.ugatu@yandex.ru*

Аннотация. На базе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG разрабатывается модель, описывающая гидролого-гидрохимические процессы и биогеохимический цикл азота в различных компонентах геосистемы речного бассейна. Полигоном для испытаний модели является крупный речной бассейн Нижнекамского водохранилища. Приводятся первые результаты применения пространственно-распределенной физико-математической модели ECOMAG-N для моделирования концентраций соединений азота в речных водах.

Ключевые слова: речной бассейн, моделирование, соединения азота, точечные и диффузные источники загрязнения, биохимическая трансформация азота.

Для моделирования содержания соединений азота в речных водах на базе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG разрабатывается модель, описывающая процессы биохимической трансформации и транспорт биогена в различных компонентах геосистемы речного бассейна. Модель ECOMAG-N (*Nitrogen*) работает с суточным шагом по времени и состоит из двух блоков: гидрологического и гидрохимического. Первая подмодель описывает процессы гидрологического цикла суши и позволяет по метеорологическим данным рассчитывать пространственные поля характеристик тепло- и влагообмена на элементарных водосборах – пространственных расчетных ячейках модели (Мотовилов, Гельфан, 2018). Гидрохимическая модель описывает процессы трансформации и миграции загрязняющих веществ (ЗВ). Источники загрязнения располагаются на поверхности земли, внутри почвы или в зоне грунтовых вод, а также выпадают на поверхность водосбора из атмосферы. Во время осадков и таяния снега ЗВ на поверхности земли растворяются в дождевой или талой воде. Часть растворенных веществ смывается с поверхностным стоком, другая часть – проникает в почву с просачивающейся водой. В почве происходит взаимодействие между почвенным раствором и твердой фазой почвы. ЗВ из почвенного раствора могут сорбироваться твердыми частицами почвы или поступать в почвенный раствор с твердых частиц. Часть ЗВ из почвенного горизонта с почвенным стоком поступает в речную сеть, другая часть проникает в зону подземных вод. Также учитываются сбросы ЗВ со сточными водами, осуществляемые непосредственно в водотоки (Motovilov, Fashchevskaya, 2019). На каждом элементарном водосборе гидрологические и гидрохимические процессы моделируются для четырех горизонтов: зоны формирования поверхностного стока, области формирования почвенного стока в верхнем горизонте (гор. А) и подстилающем его более глубоком слое почвы (гор. В), а также в зоне грунтовых вод. Поверхностная, почвенная и грунтовая составляющие стока выклиниваются в речную сеть.

Структура алгоритмов модели ECOMAG-N. В алгоритме модели ECOMAG-N каждый горизонт почвы содержит запас неорганического азота (INN), который растворен в воде и имеет равномерную концентрацию в каждой почвенно-грунтовой емкости. В дополнение к минеральной форме азота INN в горизонте А еще присутствует органический азот в виде двух групп органических веществ: консервативных, трудноминерализуемых (RON), и лабильных, легко поддающихся минерализации (LON). Процессы минерализации LON и RON, а также перенос азота между LON и RON считаются кинетическими процессами 1-го порядка. Процесс сорбции-десорбции растворимых форм соединений азота почвой описан линейной изотермой сорбции Фрейндлиха, которая предполагает, что характерное время переноса вещества потоком намного больше характерного времени сорбции, и

устанавливает связь между количеством сорбированного вещества и его концентрацией в растворе. На данном этапе разработки модели ECOMAG-N процессы нитрификации, денитрификации и еще ряд других процессов не включены в модель.

Объект исследования. Водосбор Нижнекамского водохранилища (НКВ) расположен на р. Каме между Нижнекамским (г. Набережные Челны) и Воткинским (г. Чайковский) гидроузлами и имеет площадь 186 тыс. км². Около 2/3 площади бассейна в западной и центральной частях – равнинные территории, восточная часть – Уральская горная область. На территории бассейна проявляется широтная, а в районе Уральских гор и высотная зональность. Наблюдаются переходы от климата южных и юго-западных полуаридных степных районов к более увлажненным районам (северо-восточным и восточным горнолесным). Среднегодовой боковой приток воды в НКВ составляет 36.5 км³, из которых 26.1 км³ дает сток р. Белой.

Интенсивная хозяйственная деятельность, влияющая на загрязнение речных вод азотом, ведется в бассейне НКВ в течение многих десятилетий (Фашевская и др., 2017). Река Белая – основной приемник сточных вод промышленности и жилищно-коммунального хозяйства. Значительное накопление ЗВ на водосборе за предшествующие годы хозяйственной деятельности, аварии в промышленности и на транспорте и др. вносят существенный вклад в неконтролируемое диффузное загрязнение речных вод. Сельскохозяйственные предприятия способствуют дополнительному поступлению в речную сеть соединений азота. Земли сельскохозяйственного назначения составляют >50% земельного фонда, обеднены подвижными формами биогенных элементов и поэтому нуждаются в проведении различных видов мелиораций, а также в минеральных удобрениях.

Информационное обеспечение модели ECOMAG-N включает данные гидрологического, гидрохимического, водохозяйственного, агроэкологического мониторинга в бассейне НКВ. Были построены карты пространственного распределения LON и RON по оценочным значениям содержания азота в почвах на лесных и пахотных угодьях в различных природных зонах территории НКВ (Хазиев и др., 1995). На основе форм статистической отчетности 2-ТП (водхоз) задавались сбросы азота со сточными водами непосредственно в водотоки. Собраны данные официальных статистических органов по муниципальным образованиям по внесению азотных удобрений на посевные площади. Многолетние данные о ежедневных расходах воды на гидрологических постах и о динамике содержания соединений азота в 31 створе гидрохимического мониторинга р. Белой за период 2000–2010 гг. использовались для калибровки параметров и валидации модели.

Результаты испытания модели ECOMAG-N. Результаты испытаний гидрохимического блока модели ECOMAG-N оценивались путем сопоставления рассчитанных и измеренных концентраций азота аммония в створах гидрохимического мониторинга с различным временным осреднением: суточным, поквартальным и среднемноголетним (рис. 1). Результаты с суточным разрешением (рис. 1а) показывают, что во многих случаях величина расхождения между рассчитанными и измеренными концентрациями сопоставима с величиной погрешности их измерения. Однако почти во всех створах наблюдаются редкие случаи, когда измеренные значения концентраций существенно превышают рассчитанные значения – в 5–10, а иногда и более раз. Возможными причинами таких случаев может быть залповое поступление в речную сеть азота аммония от каких-либо диффузных или точечных источников, рассредоточенных выше по водосбору.

На рис. 1б для отдельных гидрохимических створов и в целом для бассейна НКВ приведены примеры сравнения диаграмм внутригодового распределения концентраций азота аммония, осредненных за исследуемый период по кварталам. Анализ диаграмм показал, что на подавляющем большинстве створов максимумы измеренных концентраций азота наблюдаются во втором квартале, что может быть связано со смывом ЗВ с водосбора во время весеннего половодья. Лишь в нескольких створах в среднем (пос. Прибельский) и нижнем (г. Дюртюли) течении р. Белой, а также в створе р. Уфа – д. Верхний Суян максимумы измеренных концентраций азота отмечаются в первом квартале. Высокие концентрации азота

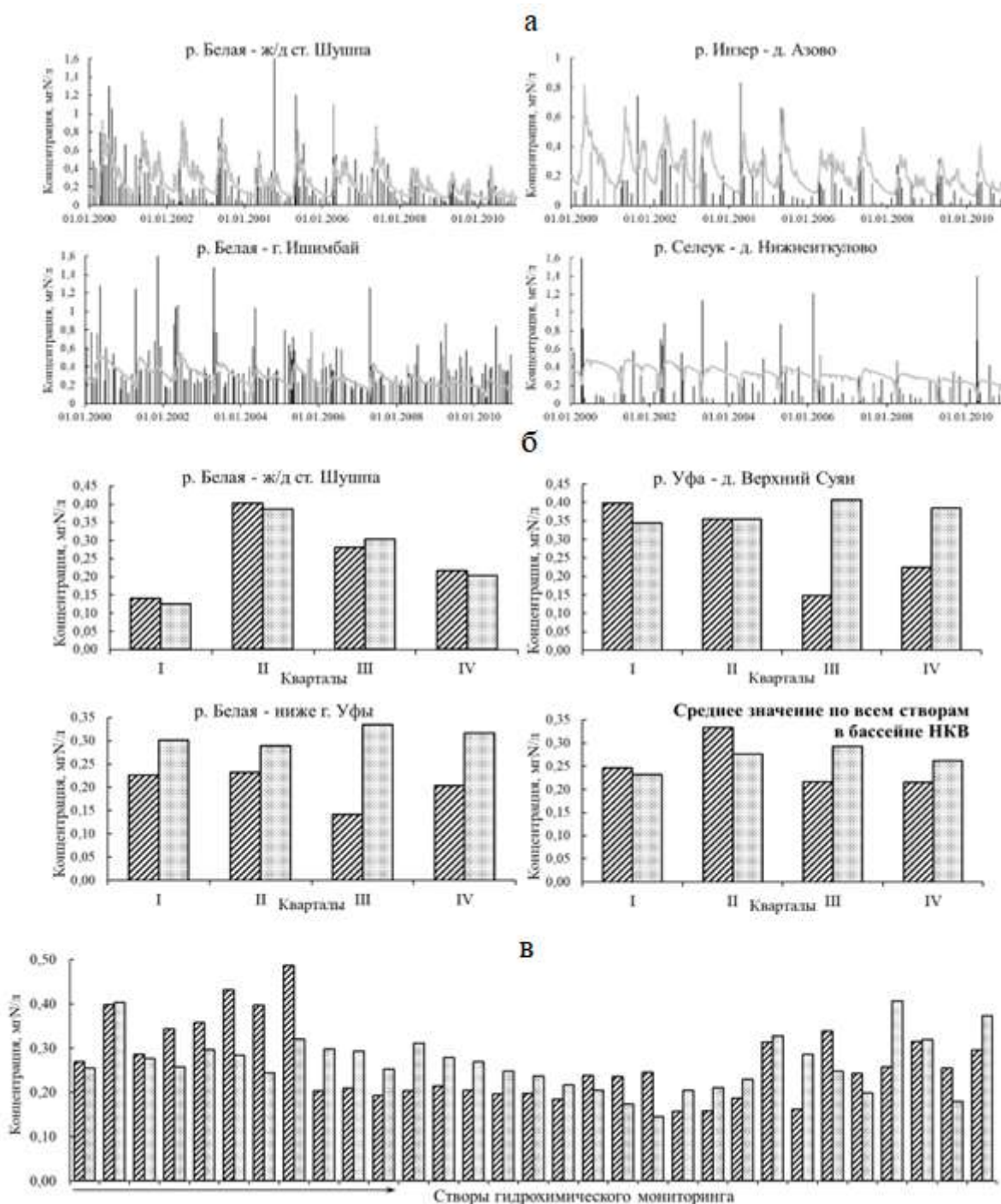


Рис. 1. Измеренные (диагонально заштрихованные и темные столбики) и рассчитанные (светлая штриховка и светлая линия) концентрации азота аммония в речной воде в створах гидрохимического мониторинга в бассейне НКВ: а – динамика концентраций с суточным разрешением, б – среднегодовое внутригодовое распределение концентраций по кварталам за 2000–2010 гг., в – среднегодовые концентрации за 2000–2010 гг. в гидрохимических створах, стрелкой указано направление течения р. Белой

аммония в речных водах в условиях пониженного водного стока в зимний период могут быть связаны лишь с несанкционированным поступлением хозяйственно-бытовых сточных вод. Максимумы рассчитанных по модели концентраций азота аммония на подавляющем большинстве створов наблюдаются в третьем квартале (лишь на нескольких – во втором квартале), что может быть связано с жизненными циклами микроорганизмов-аммонификаторов, активность которых повышается в летний период в связи с увеличением

температуры воздуха. В результате корреляционная связь между осредненными рассчитанными и измеренными концентрациями азота для 1, 2 и 4 кварталов характеризуется как умеренная – коэффициенты корреляции составляют соответственно 0.42, 0.44 и 0.36, для 3 квартала характеризуется как слабая – коэффициент корреляции составляет 0.22.

Пространственные различия среднегодовых концентраций азота аммония в створах гидрохимического мониторинга показаны на рис. 1в. Первые 18 створов – створы на р. Белой – показаны на рисунке в порядке их расположения от верховий реки в направлении к створу Нижнекамского гидроузла. Коэффициент корреляции между среднегодовыми рассчитанными по модели и измеренными в створах мониторинга концентрациями азота составляет 0.39. Разница между среднегодовыми концентрациями азота аммония, осредненными для всего бассейна НКВ за 2000–2010 гг., отсутствует: рассчитанные по модельным и по измеренным данным концентрации составляют соответственно 0.27 мгN/л и 0.26 мгN/л.

Возможные причины несоответствия (в ряде случаев) рассчитанных и измеренных концентраций азота аммония в речной воде в створах мониторинга могут быть связаны:

1. С неточным заданием объемов сброса ЗВ в речную сеть в составе сточных вод, которые в модели задаются постоянными в течение года значениями по данным форм 2-ТП (водхоз). В реальности, зачастую накопительные емкости ЗВ по максимуму опорожняются в реки именно в период весеннего половодья во втором квартале.

2. С переоценкой вклада поступления азота, связанного с жизненными циклами микроорганизмов-аммонификаторов при повышении температуры воздуха в летний период. Параметры блоков модели растительного покрова нуждаются в дополнительной калибровке.

3. Пространственное содержание различных форм азота в почвах задавалось на основе отрывочных сведений (Хазиев и др., 1995).

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВП РАН по теме FMWZ-2025-0003

Список литературы:

Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с.

Фашчевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г., Шадинова Н.Б. Пространственно-временные закономерности изменений концентраций соединений азота в водотоках Республики Башкортостан // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44. № 1. С. 63–73.

Хазиев Ф.Х., Мукатанов А.Х., Хабиров И.К., Кольцова Г.А., Габбасова И.М., Рамазанов Р.Я. Почвы Башкортостана. Т.1. Эколого-генетическая и агропроизводственная характеристика. Уфа: Гилем, 1995. 384 с.

Motovilov Y.G., Fashchevskaya T.B. Simulation of spatially-distributed copper pollution in a large river basin using the ECOMAG-HM model // Hydrological Sciences Journal. 2019. 64. P. 739–756. DOI: 10.1080/02626667.2019.1596273

УДК 550.46:504.06

ВЛИЯНИЕ КРУПНЫХ КОЛЛОИДОВ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ОЦЕНКУ КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ РЕК ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РФ

Шулькин В.М.

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия, *shulkin@tigdvo.ru*

Аннотация. Показано, что содержание крупных (0.05–0.45 мкм) коллоидов в речных водах, определенное по интенсивности динамического рассеяния света, зависит от количества и гранулометрического состава взвеси. Крупные коллоидные формы в реках ДВ РФ доминируют для Al, Fe, Ti, играют существенную роль для следовых элементов-гидролизатов (Ga, Sc, Y, Zr, REEs, Hf, Th), подчиненную для тяжелых металлов (Ni, Zn, Cu, Cd), и мало значимы для Li, Sr, Ba, Mo, U, V, As, Mn и макрокатионов.

Ключевые слова: химический состав, речные воды, крупные коллоиды, динамическое рассеяние света.

Химический состав пресных, в том числе речных вод является одним из главных показателей их качества как ресурса. Общеизвестно, что формы нахождения химических элементов и соединений не менее важны, чем их валовая концентрация в воде. Наиболее очевидно разделение на растворенные и взвешенные формы, и фильтрация через мембраны 0.45 мкм до сих пор является наиболее распространенной процедурой (напр. РД 52.24.353-2012), хотя уже более 30 лет как осознана важная роль коллоидных форм (0.001–1.0 мкм) в миграции многих химических элементов в речных водах (Buffle, Leppard, 1995). Неопределенность в сепарации растворенных, коллоидных и взвешенных форм особенно выражена для крупно коллоидных форм (0.05–0.45 мкм), которые чувствительны к коагуляции мембранных фильтров 0.45 мкм, происходящей в ходе фильтрации проб речной воды объемом более 100 мл при содержании взвеси более 10–20 мг/л (Horovitz et al., 1996). Доминирование в речных водах коллоидных форм размером 0.007–0.45 мкм для элементов-гидролизатов и некоторых тяжелых металлов было доказано методами каскадной фильтрации, ультрафильтрации и диализа (Pokrovsky et al., 2010), а также фракционированием в полевом потоке (Cuss et al., 2018). Однако во всех этих методах не определяется массовое содержание коллоидных частиц как таковых, которое, очевидно, во многом контролирует концентрацию крупно-коллоидных форм химических элементов. Целью данной работы является анализ связи между содержанием крупных коллоидов (0.05–0.45 мкм), оцененном по интенсивности динамического рассеяния света (ДРС) в фильтратах речных вод, и концентрацией в них химических элементов. Значимость крупно коллоидных форм отдельных химических элементов оценивали по степени корреляции между содержанием крупных коллоидов и концентрацией химических элементов в фильтратах <0.45 мкм. Отсутствие корреляции указывает на незначимое содержание крупно коллоидных форм. Следующая задача – характеристика природных факторов, контролирующих содержание крупных коллоидов в речных водах. Предположительно это количество и гранулометрический состав взвеси, которые, в свою очередь, зависят от сезонных вариаций водного режима, особенностей почв, ландшафтов и гидрологических характеристик водосбора.

Работы проводили на реках Дальнего Востока РФ, расположенных в различных природно-климатических зонах от южнобореальной до арктической, включая среднее течение крупнейшего водотока региона – р. Амура, его крупные правые притоки – реки Уссури, Большая Уссурка, Бикин, а также антропогенно нагруженные реки юга Приморья – Туманная и Раздольная. Эти реки были изучены во все водные фазы: осеннюю и зимнюю межень, весеннее половодье, летние дождевые паводки. Кроме того, в весеннее половодье и на его спаде были опробованы р. Камчатка и р. Колыма, расположенные в северо-бореальной и арктической зонах, соответственно. Схема района работ приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема района работ. Треугольники – места отбора проб речной воды

Пробы воды отбирали в предварительно отмытые HDPE емкости 1–2 л. Первые 100 мл фильтрата через предварительно взвешенные мембраны Millipore 0.45 мкм использовали для 1) оценки содержания крупных коллоидов (0.05–0.45 мкм) по интенсивности динамического рассеяния света (ДРС) на приборе PHOTOCOR Compact Z; 2) аликвоту этого же фильтрата подкисляли азотной кислотой двойной перегонки до pH 2 для последующего анализа элементного состава методом ИСП-МС (Agilent 7500, ЦКП ДВГИ ДВО РАН). Фильтрация еще 0.5–1.0 л продолжалась для гравиметрического определения содержания взвеси на фильтре, и РОУ методом каталитического окисления на Shimadzu TOC, а также хлоридов, сульфатов и нитратов методом ионной хроматографии в фильтратах. В пробах воды с содержанием взвеси более 50 мг/л определяли ее гранулометрический состав методом лазерной дифракции на приборе Fritsch Analyzette Nano. Ранее были проведены эксперименты с суспензиями полиметилметакрилатовых (ПММА) частиц размером 0.08–2.0 мкм, которые показали, что интенсивность ДРС линейно зависит от массового содержания частиц в интервале 1–100 мг/л и мало зависит от вариаций размера частиц (Шулькин, 2025). Это позволяет использовать величину интенсивности ДРС (имп/с, counters per sec, cps) как меру содержания крупных (0.05–0.45 мкм) коллоидов в речных водах, а также для контроля кольматации мембран при фильтрации (Шулькин, Еловский, 2025).

Содержание крупных коллоидов в речных водах ДВ РФ, выраженное через интенсивность ДРС, в первых 100 мл фильтрата через мембраны 0.45 мкм, варьирует от 5000 до 80000 имп/с. Исходя из экспериментов с суспензиями ПММА, это соответствует массовому содержанию крупных коллоидов 0.3–4.8 мг/л. Наблюдается значимая тенденция положительной связи между содержанием крупных коллоидов и общим содержанием взвеси в речных водах до 50 мг/л. Однако при содержании взвеси более 80–100 мг/л имеет место уменьшение количества крупных коллоидов в фильтратах в результате кольматации мембран (рис. 2а). Необходимо отметить высокую изменчивость уровня содержания крупных коллоидов между реками, в том числе и в пределах одного региона. Очевидно, что минимальное содержание крупных коллоидов характерно для рек Туманная, Камчатка и Колыма, а повышенное – для рек Раздольная и Уссури. Река Амур занимает промежуточное положение. Кроме того, для рек Раздольная и Уссури наблюдается и максимальная сезонная изменчивость содержания крупных коллоидов (рис. 2б).

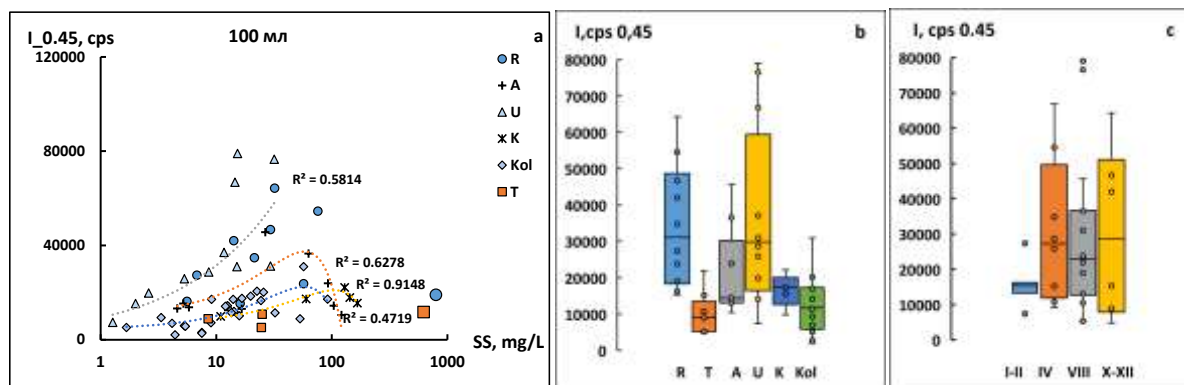


Рис. 2. Вариации содержания крупных коллоидов в речных водах ДВ РФ в зависимости от (а) содержания взвеси, (б) реки, (с) сезона (месяца). R – Раздольная, Т – Туманная, А – Амур, U – Уссури, К – Камчатка, Kol – Колыма

Если рассматривать сезонную изменчивость для всех рек, очевидно (рис. 2с), что значимо пониженное содержание крупных коллоидов характерно только для зимнего подледного периода. В остальные сезоны различия между реками значительно больше, чем влияние вариаций водного режима. Вероятной причиной региональных различий в уровне содержания крупных коллоидов отдельных рек являются особенности гранулометрического состава взвеси: по данным лазерной дифрактометрии в период высокой воды для рек Туманная, Камчатка, Колыма, и отчасти Амура, характерна повышенная роль алеврита (0.1–0.01 мм), тогда как для рек Раздольная и особенно, Уссури доминирует пелитовая (<0.01 мм) взвесь.

Элементный анализ первых 100 мл фильтратов 0.45 мкм речных вод ДВ РФ показал отсутствие связи концентрации макрокатионов (Na, K, Ca, Mg), ряда микроэлементов (Li, Sr, Ba, Mo, U, V, As, Mn) и РОУ с содержанием крупных коллоидов 0.05–0.45 мкм (рис. 3с, d, f), что указывает на практическое отсутствие крупно-коллоидных форм этих элементов в реках ДВ РФ.

Исследования с использованием ультрафильтрации и диализа также свидетельствовали о доминировании мелко-коллоидных и растворенных форм этих же элементов в реках ЕТР и Сибири (напр., Pokrovsky et al., 2010).

С другой стороны, элементы-гидролизаты, прежде всего Al, Fe, Ti (рис. 3а, b, c), но также РЗЭ, Be, Sc, Ga, Ge, Zr демонстрируют значимую корреляцию с содержанием крупных коллоидов в большинстве изученных рек. Концентрация крупно коллоидных форм халькофильных «тяжелых» металлов Cu, Ni, Zn обнаружена только в водах рек бассейна Уссури, где абсолютное и относительное содержание крупных коллоидов максимально.

Влияние крупных коллоидов на оценку качества пресных вод возможно только для химических элементов и соединений с выраженным наличием крупно коллоидных форм (Al, Fe, Ti, REEs, Be, Th и других элементов-гидролизатов): чем больше крупных коллоидов, тем вероятнее ухудшение качества вод (рис. 3а, c). Кроме того, от наличия крупных коллоидов зависит скорость коагуляции фильтров, которая вызывает занижение концентрации элементов-гидролизатов в фильтратах 0.45 мкм, и соответствующую недооценку проблем с качеством вод. Информация о содержании крупных коллоидов 0.05–0.45 мкм в фильтратах дает возможность оценить наличие и величину этого занижения. Для Ti, REEs и других следовых элементов гидролизатов, для которых ПДК пока не установлены, эти эффекты могут оказаться потенциально значимыми, поскольку нельзя исключить нормирование качества вод по этим элементам в будущем.

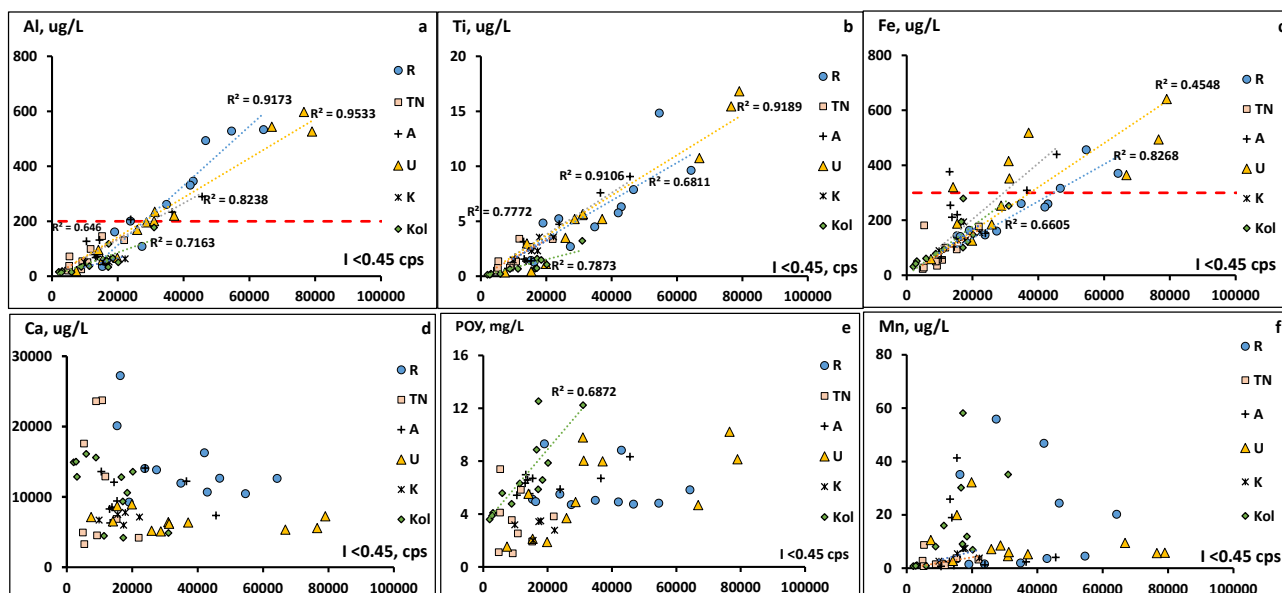


Рис. 3. Характер зависимости концентрации химических элементов с доминированием (верхний ряд Al, Ti, Fe) и отсутствием (нижний ряд Ca, РОУ, Mn) крупно-коллоидных форм от содержания крупных коллоидов в речных водах ДВ РФ. Пунктирные линии на (a) и (c) – ПДК

Список литературы:

- РД 52.24.353-2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. М.: Росгидромет, ГХИ, 2012. 35 с.
- Шулькин В.М. Применение метода динамического рассеяния света для оценки содержания крупно-коллоидных и взвешенных частиц в речных водах // Доклады РАН. Науки о Земле. 2025.Т.521. №2. С. 229-235.
- Шулькин В.М., Еловский Е.В. Оценка содержания крупных коллоидов методом динамического рассеяния света при химическом анализе речных вод Дальнего Востока РФ // Водные ресурсы. 2025. том 52. №4. С. 78–93.
- Buffle J., Leppard J. Characterization of aquatic colloids and macromolecules. 1. Structure and behavior of colloidal material // Environ. Sci. Technol. 1995. 29. P. 2169–2 175.
- Cuss C.W., Donner M.W., Grant-Weaver I. et al. Measuring the distribution of trace elements amongst dissolved colloidal species as a fingerprint for the contribution of tributaries to large boreal rivers // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 642. P. 1242–1251.
- Horowitz A.J., Lum K.R., Garbarino J.R. et al. Problems associated with using filtration to define dissolved trace element concentrations in natural water samples // Environ. Sci. Technol. 1996. Vol. 30. P. 954.
- Pokrovsky O.S., Viers J., Shirokova L.S. et al. Dissolved, suspended, and colloidal fluxes of organic carbon, major and trace elements in the Severnaya Dvina River and its tributary // Chem. Geol. 2010. Vol. 273. P. 136–149.

УДК 556.55:504.4

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ БАЛАНСА ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Кашутина Е.А.¹, Ясинский С.В.¹, Гришанцева Е.С.^{1,2}, Расулова А.М.³, Сидорова М.В.¹,
Алферова А.А.⁴

¹Институт географии РАН, Москва, Россия, *kashutina@igras.ru*

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга»), Санкт-Петербург, Россия

⁴Высшая школа экономики, Москва, Россия

Аннотация. Для водохранилищ Верхневолжского каскада (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское) определены факторы стабильно неудовлетворительного качества воды, сохраняющегося даже в многоводные годы. По предварительным оценкам доля диффузного загрязнения составляет от 20 до 70% в зависимости от водохранилища, а вклад абразии берегов в поступление азота и фосфора не превышает первых процентов.

Ключевые слова: верхневолжские водохранилища, баланс химических веществ, диффузное загрязнение, биогенные элементы, качество воды, ландшафтно-гидрологическая модель ЛГМ-2.

Несмотря на спад промышленного производства в 1990-е гг., качество воды крупных водохранилищ России остается стабильно неудовлетворительным. Бассейн Верхней Волги — один из наиболее густонаселенных и промышленно развитых регионов, где аккумулируется от 20 до 80% суммарного сброса загрязняющих веществ по стране. Вода водохранилищ каскада (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское) классифицируется как «очень загрязненная» и «грязная» (Качество..., 2025; Обзор..., 2025; Черногаева и др., 2023). При этом в многоводные годы ожидаемый эффект разбавления не проявляется, вероятно, из-за роста диффузного стока с водосбора (Диффузное ..., 2020; Ясинский и др., 2024). Цель работы — выявить и количественно оценить основные факторы, влияющие на сохранение неблагоприятного состояния водохранилищ каскада.

В качестве метода исследования предлагается использовать уравнение баланса химических веществ водохранилища. К главным факторам формирования баланса относятся: поступление веществ с притоком к верхнему створу; отток из водохранилища через нижний створ (плотину); поступление веществ с боковым притоком с местного водосбора; внутриводоемные процессы, включающие осаждение и выход веществ из донных осадков, а также биохимические и химические трансформации соединений. Значимый вклад для отдельных веществ может вносить поступление с атмосферными осадками и осаждением на акваторию, газообмен с атмосферой, а также абразия берегов. Боковой приток определяется как результат диффузного стока с местного водосбора и поступления веществ со сточными водами в притоки водохранилища и непосредственно в само водохранилище. Для оценки диффузного стока применена ландшафтно-гидрологическая модель Института географии РАН ЛГМ-2, верифицированная по данным государственного гидрохимического мониторинга на притоках водохранилищ (Ясинский и др., 2020).

Содержание веществ в водохранилищах определялось по результатам наблюдений Росводресурсов с начала XXI в. (от 5 до 11 раз в год, до 15 створов на каждом из пяти водохранилищ). Масса вещества в водохранилище на дату измерений рассчитывалась как произведение осредненной по всему водоему концентрации вещества и объема воды на эту дату. Далее осреднением были получены значения масс по месяцам, а из них определены среднесезонные и среднегодовые показатели (Кашутина и др., 2024). В отличие от объема воды (межгодовая изменчивость 3–13 %), массы химических веществ от года к году меняются на

десятки и сотни процентов, а для фенолов и взвешенных веществ – на тысячи процентов. Внутригодовая изменчивость содержания металлов достигает 13–37 раз.

С учетом коэффициентов водообмена можно определить общую массу химического вещества, проходящего через водохранилище за определенный период. Этот показатель считается базовым, и относительно него рассчитывается вклад разных факторов в содержание веществ в водохранилище для разных периодов. Получены предварительные оценки вклада отдельных источников в баланс веществ верхневолжских водохранилищ для трех лет разной водности. Наибольший вклад, по-видимому, связан с диффузными источниками, как и было ранее определено в научной части программы «Оздоровление Волги» (Диффузное..., 2020). По предварительным оценкам, доля диффузного выноса в загрязнении водохранилищ Верхневолжского каскада составляет от 20 до 70% в зависимости от водохранилища.

Вклад абразии берегов в поступление азота и фосфора в водохранилища каскада невелик (не более первых процентов). Однако для металлов ситуация иная: если предположить полный переход поступающего с абразией железа в растворенную форму, то его доля относительно общей растворенной массы в водной толще варьирует от 24 до 75% по разным водохранилищам. Для марганца этот показатель составляет от 2 до 59% (Yasinsky, 2026). Следует отметить, что эти цифры представляются завышенными, поскольку не учитывают водообмен в водохранилищах и биохимический цикл металлов в водной толще и донных отложениях, и требуют дальнейшего уточнения.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 25-27-00564 «Годовые и сезонные балансы загрязняющих веществ в каскадах Верхневолжских и Камских водохранилищ».

Список литературы:

Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. Коллективная монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.

Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2024 / Гл. ред. М. М. Трофимчук. Ростов-на-Дону: ФГБУ "Гидрохимический институт", 2025. 450 с.

Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Гришанцева Е.С., Расулова А.М., Фасахов М.А., Шайдулина А.А. Массовое содержание загрязняющих веществ в воде верхневолжских водохранилищ в годы разной водности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 6. С. 38–60.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год / Отв. ред. Г.М. Черногаева. Москва: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2025. 222 с.

Черногаева Г.М., Журавлева Л.Р., Малеванов Ю.А. Интегральная оценка качества воды в бассейне Волги по данным мониторинга в XXI в. // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 875–884.

Ясинский С.В., Гришанцева Е.С., Расулова А.М., Фасахов М.А., Шайдулина А.А., Кашутина Е.А. Современное состояние качества воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2024. Т. 88, № 6. С. 913–933.

Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В., Нарыков А.Н. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 630–648.

Yasinsky S., Rasulova A., Sobol I., Khokhlov D., Oganessian L. Input of Inorganic Matter into Upper Volga Reservoirs from Shoreline Abrasion // CLEAN – Soil Air Water. 2025. Vol. 54(5). DOI:10.1002/clen.70187

СЕКЦИЯ 2. ВОДНЫЙ БАЛАНС, ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ТЕРРИТОРИИ

УДК 551.48(476)

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ РЕКИ ДНЕПР НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

Волчек А.А.

Брестский государственный технический университет, Брест,
Беларусь, *prof.volchak@yandex.by*

Аннотация. На основании анализа временных рядов годового, максимального, минимального летне-осеннего и зимнего стоков по реке Днепр в створах гг. Орша и Речица за период с 1877 по 2023 гг. получены закономерности формирования стока за период наблюдений, период активных мелиораций и современных климатических изменений. С использованием гидролого-климатической модели даны прогнозные оценки стока рек на ближнюю перспективу в зависимости от различных сценариев изменения климата.

Ключевые слова: водные ресурсы, сток, климат, прогнозные оценки.

Водные ресурсы являются важным фактором экономического развития любой страны. Поэтому им уделяется особое внимание. Днепр самая большая река в Беларуси и четвертая по длине в Европе. От истока до устья в естественном состоянии составляла 2285 км, в настоящее время, когда во многих местах выпрямили фарватер – 2201 км. Протекает по территории трех государств: России, Беларуси и Украине длиной 485, 595 и 1121 км соответственно. Площадь водосборного бассейна – 504000 км², средний расход воды в устье – 1670 м³/с. Среднегодовой расход воды у г. Орша – 126 м³/с, у г. Речица – 363 м³/с. Максимальный расход воды у г. Орши 2000 м³/с (1931 г.), минимальный – 8 м³/с (1893 г.), у г. Речица соответственно – 4970 м³/с (1958 г.), 36 м³/с (1922 г.).

Целью настоящей работы является оценка современного состояния и прогноз водных ресурсов р. Днепр на территории Беларуси.

Исходными данными послужили материалы наблюдений за среднегодовыми, максимальными весеннего половодья, минимальными летне-осенними и зимними расходами воды за период с 1877 по 2023 гг. по гидропостам г. Орша и г. Речица. Пропуски в рядах наблюдений за гидрологическими характеристиками восстановлены с помощью программного комплекса «Гидролог-2» (Волчек, Парфомук, 2009). Для оценки влияния современных климатических изменений на сток исходные временные ряды разбиты на два интервала 1877–1986 и 1987–2023 гг., для оценки влияния крупномасштабных мелиораций рассматривались интервалы 1877–1965 и 1966–2023 гг. а также интервал с 1974 по 2023 гг. (50 лет) для массовых расчетов гидрологических характеристик.

Для прогнозных оценок изменения стока рек бассейна Днепра, использован метод гидролого-климатических расчетов, предложенный В. С. Мезенцевым (Мезенцев, 1995), основанный на совместном решении уравнений водного и теплоэнергетического балансов с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и климатический сток) в годовом разрезе. Метод адаптирован нами для условий Беларуси (Волчек, 1986; Волчек, Парфомук, 2007). Разработанная компьютерная модель использована для оценки возможных изменений водных ресурсов рек в зависимости от тех или иных гипотез климатических колебаний и антропогенных воздействий на характеристики водосборов.

Для прогнозов изменения климата использованы глобальные и региональные климатические модели, которые основаны на описании процессов в динамике и базируются на численном решении систем уравнений в частных производных математической физики.

Результаты моделирования с помощью глобальной модели служат граничными и начальными условиями для региональной климатической модели, которая уточняет глобальный прогноз с использованием более мелкой сетки.

Для выделенных временных интервалов определены основные гидрологические характеристики по методикам, изложенным в (Волчек, 2021) и представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные гидрологические характеристики р. Днепр в створах г. Орша (числитель) и г. Речица (знаменатель).

Параметры	Период осреднения, годы (лет)					
	1877-2023 (147)	1877-1986 (110)	1987-2023 (37)	1877-1965 (89)	1966-2023 (58)	1974-2023 (50)
Средние годовые расходы воды						
$Q_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$	126/363	125/365	132/358	128/374	124/347	128/351
$Q_{\text{max}}, \text{м}^3/\text{с}$	229/598	229/598	213/525	229/598	213/525	213/525
Год	1908/1958	1908/1958	1998/1998	1908/1958	1998/1998	1998/1998
$Q_{\text{min}}, \text{м}^3/\text{с}$	53.2/176	60.3/176	53.2/190	60.3/176	53.2/190	53.2/190
Год	2015/1921	1921/1921	2015/2015	1921/1921	2015/2015	2015/2015
C_v	0.26/0.22	0.26/0.22	0.26/0.21	0.26/0.22	0.25/0.19	0.25/0.19
C_s	0.67/0.52	0.95/0.65	-0.06/0.01	0.82/0.47	0.36/0.31	0.21/0.22
$r(1)$	0.30/0.27	0.27/0.24	0.35/0.36	0.23/0.21	0.42/0.34	0.38/0.38
$\Delta q, \text{м}^3/\text{с}$ 10 лет	-0.40/-3.00	-1.97/-5.55	-8.37/-8.20	-1.24/-3.32	3.35/5.60	0.89/3.82
r	-0.05/-0.16	-0.20/-0.22	-0.27/-0.12	-0.1/-0.1	0.18/0.14	0.04/0.08
% от $Q_{\text{ср}}$	-0.32/-0.83	-1.6/-1.5	-6.3/-2.3	-1.0/-0.9	2.7/1.6	0.7/1.4
Максимальные расходы воды весеннего половодья						
$Q_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$	781/1706	875/1969	503/926	936/2130	544/1050	520/979
$Q_{\text{max}}, \text{м}^3/\text{с}$	2000/4970	2000/4970	1020/2000	2000/4970	1020/3300	1020/2080
Год	1931/1958	1931/1958	2013/2023	1931/1958	2013/1970	2013/1979
$Q_{\text{min}}, \text{м}^3/\text{с}$	189/398	304/487	189/398	355/700	189/398	189/398
Год	2015/2015	1974/1974	2015/2015	1930/1925	2015/2015	2015/2015
C_v	0.45/0.60	0.40/0.52	0.38/0.43	0.37/0.49	0.35/0.48	0.34/0.42
C_s	0.93/1.20	0.86/1.01	0.85/1.32	0.71/0.87	0.54/1.97	0.59/1.12
$r(1)$	0.23/0.21	0.00/0.00	0.23/0.12	-0.17/-0.13	0.26/0.15	0.21/0.13
$\Delta q, \text{м}^3/\text{с}$ 10 лет	-40.78/114.13	-28.23/-81.26	-22.49/6.33	-1.54/-12.81	-36.99/-88.59	-21.52/-38.21
r	-0.49/0.48	-0.26/0.25	-0.13/0.02	-0.01/-0.03	-0.33/-0.30	-0.18/-0.14
% от $Q_{\text{ср}}$	-5.22/6.69	-3.2/-4.1	-4.5/0.7	-0.2/-0.6	-6.8/-8.4	-4.1/-3.9
Минимальные летне-осеннего расходы воды						
$Q_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$	34.1/153	31.2/149	42.6/166	30.9/148	38.9/160	40.7/164
$Q_{\text{max}}, \text{м}^3/\text{с}$	85.8/333	85.8/285	66.0/333	85.8/285	66.0/333	66.0/333
Год	1933/1998	1933/1933	1991/1998	1933/1933	1991/1998	1991/1998
$Q_{\text{min}}, \text{м}^3/\text{с}$	15.0/89.0	15.0/93.0	19.6/89.0	15.0/93.0	19.6/89.0	19.6/89.0
Год	1939/2015	1939/1920	2015/2015	1939/1920	2015/2015	2015/2015
C_v	0.35/0.24	0.34/0.22	0.29/0.26	0.37/0.24	0.30/0.24	0.28/0.24
C_s	1.29/1.48	1.95/1.33	0.35/1.55	1.97/1.33	0.83/1.76	0.68/1.67
$r(1)$	0.43/0.25	0.22/0.14	0.50/0.36	0.22/0.17	0.56/0.32	0.50/0.29
$\Delta q, \text{м}^3/\text{с}$ 10 лет	1.01/1.02	0.44/-0.14	-3.20/-15.30	0.48/-0.67	1.91/0.70	0.52/-4.23
r	0.36/0.12	0.13/-0.01	-0.28/ 0.40	0.11/-0.05	0.28/0.03	0.07/-0.16
% от $Q_{\text{ср}}$	2.96/0.67	1.4/-0.1	-7.5/-9.2	1.6/-0.5	4.9/0.4	1.3/-2.6
Минимальные зимние расходы воды						
$Q_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$	30.1/131	24.7/109	46.1/198	22.9/100	41.1/179	43.6/187
$Q_{\text{max}}, \text{м}^3/\text{с}$	87.7/343	56.1/256	87.7/343	50.6/256	87.7/343	87.7/343
Год	2007/1999	1981/1961	2007/1999	1879/1961	2007/1999	2007/1999
$Q_{\text{min}}, \text{м}^3/\text{с}$	8.00/36.0	8.00/36.0	12.8/109	8.00/36.0	12.8/68.3	12.8/68.3
Год	1893/1922	1893/1922	2003/1987	1893/1922	2003/1974	2003/1974
C_v	0.52/0.47	0.42/0.42	0.39/0.29	0.40/0.40	0.42/0.33	0.40/0.32

C_s	1.28/0.95	0.87/0.95	0.51/0.81	0.63/1.02	0.77/0.67	0.64/0.49
$r(1)$	0.42/0.48	0.24/0.21	-0.04/-0.01	0.11/0.10	0.15/0.20	0.02/0.06
$\Delta q, \text{ м}^3/\text{с 10 лет}$	2.17/9.38	1.27/5.70	-0.36/5.20	0.76/3.39	3.68/5.78	2.26/12.99
r	0.59/0.64	0.39/0.40	-0.02/0.10	0.22/0.22	0.36/0.45	0.19/0.32
% от $Q_{\text{ср.}}$	7.21/7.14	5.1/5.2	-0.8/2.6	3.3/3.4	8.9/3.2	5.2/6.9

Примечание: $Q_{\text{ср.}}$ – расход воды соответствующего вида стока, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_{max} – максимальный расход воды соответствующего вида стока и год его формирования, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_{min} – минимальный расход воды соответствующего вида стока и год его формирования, $\text{м}^3/\text{с}$; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии; $r(1)$ – коэффициент автокорреляции; $\Delta q, \text{ м}^3/\text{с 10 лет}$ – градиент изменения стока; r – коэффициент корреляции линии тренда; % от $Q_{\text{ср.}}$ – изменение стока за 10 лет к среднему значению; выделены статистически значимые.

Анализ табл. 1 показал, что нет статистически значимых различий в среднегодовых расходах воды, также в коэффициентах вариации. Коэффициенты асимметрии имеют больший разброс, но это связано с различием в исследуемых периодах. Имеется небольшая тенденция уменьшения стока в период с начала расчетного периода до современного потепления. Статистически значимые различия имеют место в максимальных расходах воды весеннего половодья. Это связано с частыми зимними оттепелями, что приводит к таянию снеговых запасов еще в период зимы и на начало половодья снеговые запасы значительно израсходованы. Коэффициенты вариации и асимметрии значительно не меняются. Минимальные расходы воды за летне-осенний период существенно не изменились. Существенно увеличились минимальные зимние расходы воды, что привело к уменьшению максимальных расходов воды весеннего половодья. Аналогичные результаты получены нами ранее для Беларуси в целом (Волчек, 2023).

По методике гидролого-климатических расчетов получены прогнозные оценки изменения речного стока в бассейне р. Днепра на территории Беларуси на период до 2035 года. При этом использовались результаты оценки фактического изменения климата и речного стока за период с 1961 по 2015 гг. и уточненный прогноз изменения климата на период до 2035 года в данных бассейнах рек с учетом мультимодельного ансамбля из четырех сценариев, рекомендуемого МГЭИК, а также региональной изменчивости климата (Волчек и др., 2017).

По прогнозным оценкам изменения объемов стока также возможна резкая дифференциация между северной и южной частью водосбора, между малыми и большими реками. При незначительном изменении стока в среднем за год, высокая вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Особенно значительно может изменяться сток в летние месяцы с его снижением во все сезоны на юге бассейна. Вместе с тем для севера водосбора прогнозируются не столь значительные изменения стока, как для юга.

Следует отметить, что прогнозные оценки изменения стока рек в условиях изменяющегося климата следует рассматривать как вероятностные, связанные с допущением ряда неопределенностей исходя из различных факторов, основные из которых, это:

- погрешность выявленных тенденций изменения метеорологических и гидрологических характеристик с учетом оценки статистической значимости этих тенденций;
- неопределенность и неоднозначность сценариев изменения климата;
- неопределенность результатов расчетов с использованием гидрологических моделей для прогнозирования стока, обусловленную как погрешностями самих моделей и их верификации, так и неопределенностями используемых в них данных и коэффициентов;
- неопределенность прогнозов влияния факторов антропогенной нагрузки на водные ресурсы с учетом изменения климата.

Однако значимость оценок и прогнозов речного стока в условиях изменяющегося климата определяется целесообразностью их последующего учета при планировании водоохранных и водохозяйственных мероприятий, связанных с совершенствованием управления речным бассейном Днепра.

Особенно это актуально в связи с тем, что одним из наиболее негативных последствий изменения климата для речного стока является возможное увеличение частоты и

интенсивности неблагоприятных метеорологических и гидрологических явлений. К этим явлениям относятся ливни, засухи, поздние заморозки, наводнения, обусловленные паводками и половодьями, особенно при соединении факторов таяния снега и осадков в виде мокрого снега и дождя, а также возможного увеличения продолжительности половодья.

Усиление неравномерности внутригодового распределения стока и увеличение рисков наводнений, обусловленных резкими оттепелями в зимний период, более ранним наступлением весеннего половодья и увеличением интенсивности дождевых паводков может привести к увеличению рисков экстремальных явлений.

Проблема возникновения маловодных периодов также актуальна для бассейна р. Днепр. Хотя в настоящее и будущее время нет явных предпосылок для возникновения дефицита водных ресурсов, тем не менее, повышается вероятность наступления длительных маловодных периодов. Во время маловодных периодов может произойти ухудшение экологического состояния и рекреационного потенциала поверхностных водных объектов и прилегающих территорий, изменение гидрогеологического режима грунтовых вод, истощение почвенного покрова в пойме и т.п.

Кроме того, за счет возможного увеличения частоты и продолжительности засушливых периодов повышаются риски существенного уменьшения стока малых рек со снижением в них уровня воды, ухудшением ее качества и уменьшением рекреационного потенциала этих рек.

Поэтому разработка и реализация мер по адаптации к изменению климата в части совершенствования управления водными ресурсами является актуальной задачей.

Список литературы:

Волчек А.А. Водные ресурсы Беларуси и экологические риски // Вопросы географии / Русское географическое общество. – Сб. 157. Водные проблемы и их решение / В.М. Котляков и др. М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. С. 81–104.

Волчек А.А. Гидрологические расчеты: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2021. 418 с.

Волчек А.А. Методика определения максимально возможного испарения по массовым метеоданным (на примере Белоруссии) // Научно-техническая информация по мелиорации и водному хозяйству (Минводхоз БССР). 1986. № 12. С. 17–21.

Волчек А.А., Корнеев В.Н., Парфомук С.И., Булак И.А. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата // Под общ. ред. А.А. Волчек, В.Н. Корнеева. Брест: Альтернатива, 2017. 228 с.

Волчек А.А., Парфомук С.И. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2007. № 1. С. 50 – 62.

Волчек А.А., Парфомук С.И. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока // Веснік Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. 2009. № 1. С. 22–30.

Мезенцев В.С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования // Водные ресурсы. 1995. Том 22. № 3. С. 299–301.

УДК 910.3

ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ВОДЫ В ОЗЕРЕ УВИЛЬДЫ

Второва А.И.

Отдел водных ресурсов по Челябинской и Курганской областям

Нижне-Обского бассейнового водного управления, Челябинск, Россия, *avtorova86@mail.ru*

Аннотация. Выполнен вероятностный анализ внутригодовой и многолетней изменчивости уровня озера Увильды Южного Урала России. Применены методы теории случайных процессов. Результаты анализа обобщены в терминах вероятностной модели. Учтены изменения климата.

Ключевые слова: Южный Урал, озеро, уровни воды, изменчивость, вероятностный анализ, изменение климата, антропогенный фактор.

Увильды – уникальный пресноводный водоем на Южном Урале тектонического происхождения, крупное озеро Челябинской области по площади водного зеркала и по объему. Площадь озера Увильды – 68.1 тыс. км², объем – 1014 млн м³ (Андреева, 1966).

До освоения территории (17 век) из озера Увильды вытекала река Зюзелка (приток реки Теча), что характеризует положительный баланс озера и возможность восполнения его чаши естественным путем.

Озеро Увильды питается как за счет поверхностного стока, так и подземных источников. В озеро Увильды впадают малые реки Косая и Черемшанка.

Созданные в разные периоды гидротехнические сооружения каналы: Увильдинская канава (вторая половина 19 века), оз. Увильды – оз. Малые Ирдяги (1933 г.) Увильды–Аргазы (1976 г.) для отвода воды из озера поддерживали уровенный режим озера как сточного.

В 1869–1870 годах от озера Увильды в сторону Кыштыма проложили Увильдинскую канаву. В результате сток воды из озера в реку Зюзелга (Зюзелка), прекратился.

Ранее из оз. Увильды вытекал водоток на юго-восток, и через оз. Малые Ирдяги и Большие Ирдяги вода попадала в реку Зюзелга правый приток реки Течи.

В 1975 году в результате засухи в Челябинской области возник дефицит воды для бесперебойного водоснабжения г. Челябинск. Для пополнения воды Шершневого водохранилища на реке Миасс (источник водоснабжения г. Челябинск), был прорыт канал Увильды–Аргазы, по которому вода из озера сбрасывалась в Аргазинское водохранилище на реке Миасс. Аргазинское и Шершневское водохранилища на реке Миасс работают в каскаде, расположенные в 150 км друг от друга. За время засухи уровень воды в оз. Увильды (1976–1977 гг.) понизился на 4 метра и восстановился только к 2006 году. Для восстановления уровня оз. Увильды в прежних отметках, каналы законсервированы – сброс воды из озера прекращен.

Последний полувековой период озеро из сточного перешло в разряд бессточного.

Несмотря на антропогенную составляющую его уровенный режим является интегральным показателем увлаженности и изменения климата на Южном Урале.

Максимальный уровень воды в озере зафиксирован в августе 1943 года – 277.17 м БС.

Минимальный – в январе 1977 г. – 271.37 м БС.

Южный Урал расположен в зоне умеренно-континентального климата, обусловленного большой удаленностью от морей и океанов. Влияние на климат Урала морских воздушных масс, несущих влагу с атлантического океана и вторжение воздушных масс с севера значительно.

Также на формирование уровенного режима оказывают влияние особенности подстилающей поверхности и строение самой озерной системы. Антропогенный фактор (принудительный сброс воды через каналы), несомненно, искажают естественный многолетний ход уровня озера.

Особенности многолетних колебаний уровня озера

Для анализа многолетней изменчивости уровня воды в озере использовались средние годовые значения высоты уровня $H(t)$, а также ежегодные последовательности средних

величин для всех месяцев года $H_i(t)$, где $i = 1, \dots, 12$. Эти ряды интерпретировались как близкие к стационарным случайным процессам, за основную вероятностную характеристику которых принимались функции распределения вероятностей значений высот уровня $F(H)$ и $F_i(H)$.

Дополнительно для детализации особенностей многолетних изменений привлекался и ряд средних месячных уровней. Для изучения структуры временных рядов выполнялась их фильтрация. Традиционно для этих целей применяются различные аппроксимирующие функции (кубические сплайны, преобразование Фурье). В данной работе проводилась фильтрация Баттерворта (Рожков, Трапезников, 1990). Также проведена проверка на однородность.

Гидрологический ряд считается однородным, если в течение всего рассматриваемого периода условия формирования стока оставались неизменными.

В рамках модели случайной величины для проверки гидрологических рядов на однородность используются стандартные статистические критерии Фишера и Стьюдента.

Гипотеза об однородности ряда по среднему значению не опровергается, если выполняется неравенство:

$$|t^*| < t_{2\alpha}; \quad F^* < F_{2\alpha}$$

Результаты проверки рядов на однородность по критериям Стьюдента и Фишера, при $2\alpha = 5\%$ приведены ниже в табличном варианте.

Градация уровней	$ t^* $	$t_{2\alpha}$	F^*	$F_{2\alpha}$	$H_0: \bar{Q}_1 = \bar{Q}_2$	$H_0: D_1 - D_2$
Среднегодовой	1.67	1.99	4.03	1.78	Не опровергается	Опровергается
Максимальный	1.67	2.00	5.84	1.80	Не опровергается	Опровергается

Рассматриваемые ряды уровней озера, не соответствуют модели случайной величины (нельзя назвать однородными) по дисперсии (критерий Фишера), то есть, в течение всего рассматриваемого периода, имело место изменение условий формирования стока.

В нашем случае на изменение условий формирования стока, повлияло антропогенное воздействие, что привело к изменению статистических характеристик ряда по дисперсии.

Для изучения структуры временного ряда уровней воды оз. Увильды использовались данные о среднегодовых значениях уровня воды за период инструментальных наблюдений с 1943 по 2021 гг. (78 лет).

Для объяснения выявленных особенностей многолетних колебаний уровня озера привлекались данные наблюдений за температурой воздуха и осадками на метеостанциях Миасс, Аргаяш и метеопостах Увильды и Карабаш.

Для характеристики многолетней изменчивости увлажненности были рассчитаны временные ряды индексов Де-Мартона α^M за период с 1936 по 2024 г. с использованием данных по метеопунктам прилегающим к территории озера. Рассчитанные ряды индексов Де-Мартона α^M приведены на рис. 1.

На полученных графиках наблюдается незначительный отрицательный тренд на Карабаш, что свидетельствует об уменьшении увлажненности территории. На остальных графиках наблюдается незначительный положительный тренд озерного бассейна, следовательно, доминирует увлажненность территории.

Установленные циклы дают возможность провести фильтрацию рядов и выделить значимые гармонические составляющие. Для этих целей существуют различные аппроксимирующие функции (кубические сплайны, преобразование Фурье и т.п.). В данной работе для выделения гармоник и фиксаций квазипериодических колебаний использован фильтр Баттерворта.

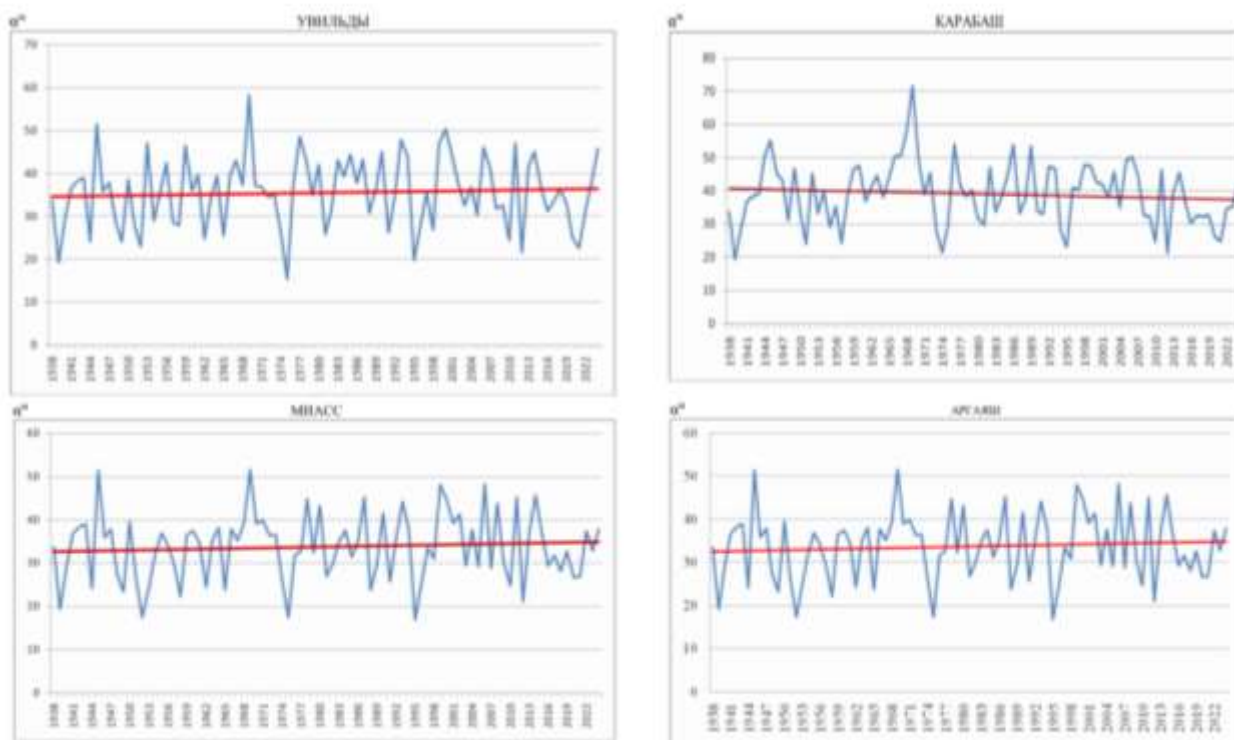


Рис. 1. Индексы Де-Мартона

На рис. 2 приведен график колебаний уровня озера за весь период инструментальных наблюдений. Для многолетней изменчивости уровня воды в оз. Увильды характерно наличие статистически значимого линейного тренда на понижение. Как видно из графика, минимум уровней пришелся на 70-е годы. Максимальный уровень наблюдался в 1943 году.

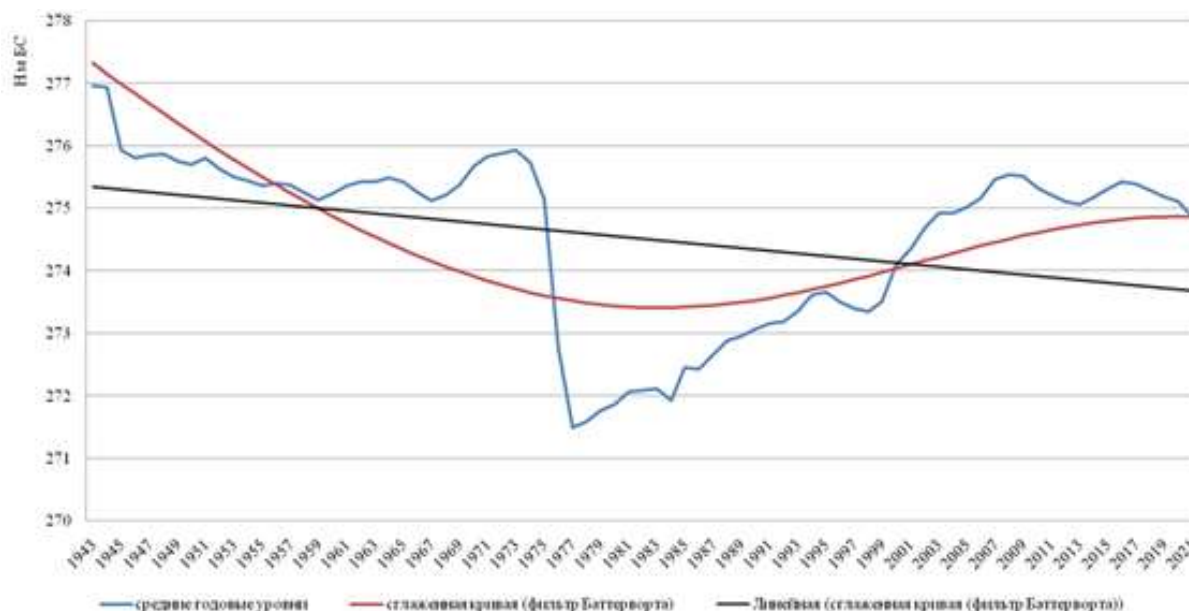


Рис. 2. Хронологический график хода уровней воды оз. Увильды

Особенности внутригодовых колебаний уровня озера

Для анализа ритмики годовой цикличности уровня воды в оз. Увильды использовался метод теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП). (Филатов 2014).

Основными вероятностными оценками ПКСП являются математическое ожидание $m(t)$, дисперсия $D(t)$, матрица корреляционных зависимостей внутригодовой изменчивости $K(t, x)$. Они хорошо отображают особенности ритмики годовой цикличности гидрометеорологических процессов.

На рис. 3 представлен график оценок математического ожидания и дисперсии внутригодовых колебаний уровня воды озера за весь период инструментальных наблюдений.

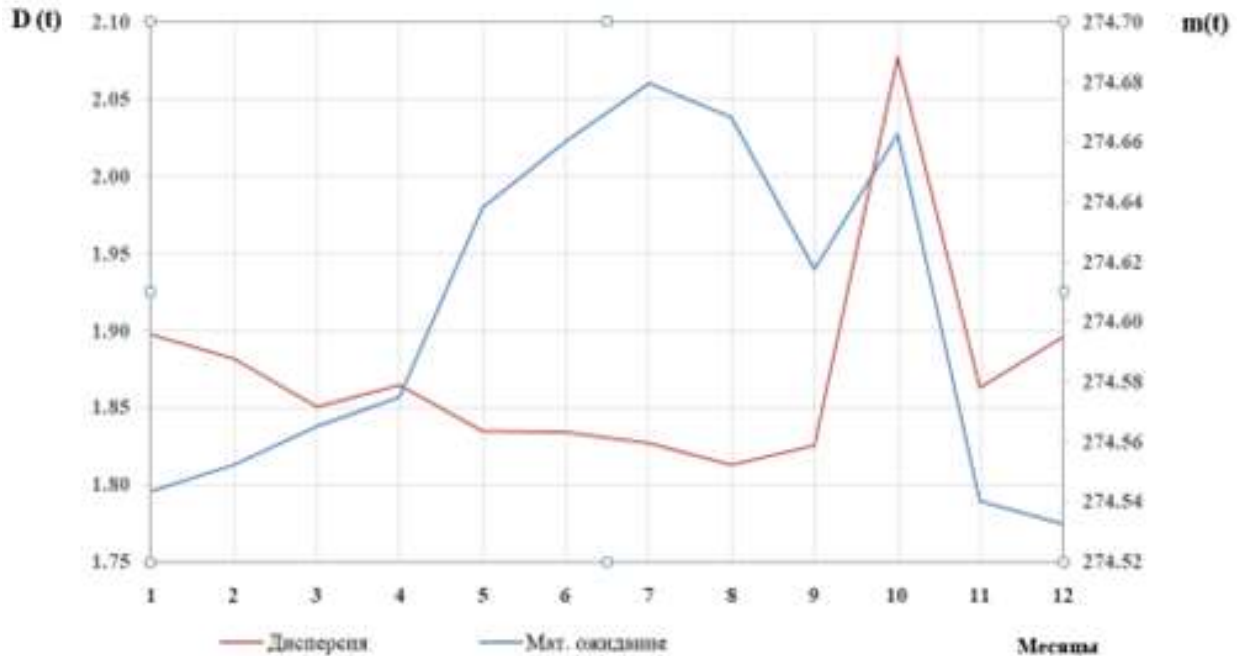


Рис. 3. График оценок математического ожидания и дисперсии средних месячных уровней воды оз. Увильды

Математическое ожидание ПКСП характеризует регулярную компоненту внутригодовых изменений процесса и позволяет оценить средний многолетний повторяющийся образ внутригодового колебания; дисперсия – отклонения процесса от средней многолетней нормы.

На графике (см. рис. 3), кривая среднего многолетнего внутригодового хода уровня озера характеризуется сглаженным ходом. Она имеет четко выраженный сезонный характер. Максимум наблюдался в июле, минимум – в зимний период. За период наблюдения на кривой дисперсии наблюдается один ярко выраженный максимум – в октябре.

Для оценки внутригодовой изменчивости уровней воды в оз. Увильды были построены корреляционные зависимости $K(t, T)$ за период инструментальных наблюдений (рис. 4).

Анализ оценок $K(t, T)$ показывает, что при временном сдвиге $i=1, Ki(1)$ для всех месяцев года близки к 1.0. Для всех месяцев связи как «вперед», так и «назад» при сдвиге 2–4 мес. Затухают, но продолжают флуктуировать в дальнейшем. При сдвиге $i=2-4$ мес., $Ki(1)$ находятся в области отрицательных значений и остаются значимыми для весенних и летних месяцев. Корреляционные связи внутри года для колебаний уровня симметричны и однотипны для всех месяцев.

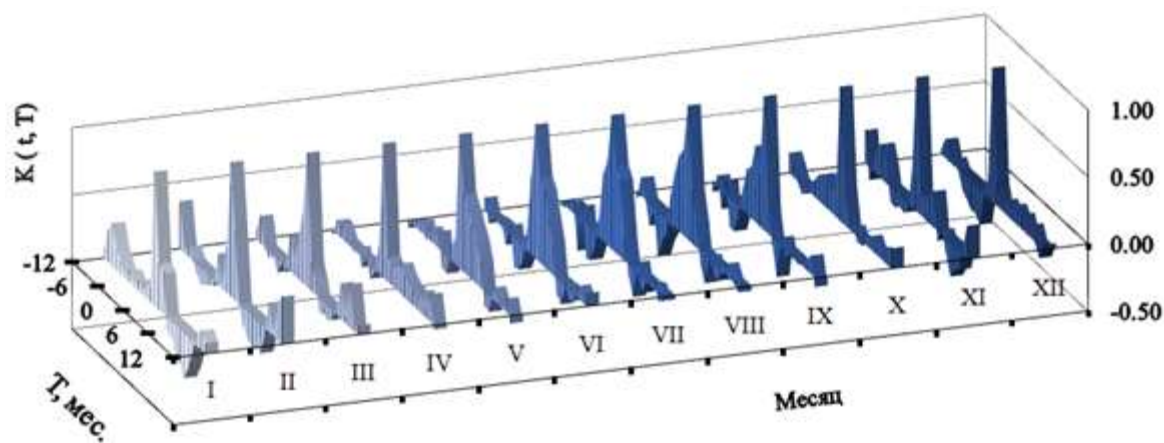


Рис. 4. График оценки корреляционной зависимости внутригодовой изменчивости хода уровней воды оз. Увильды

Список литературы:

- Андреева М.А. Водный баланс озер Челябинской области // Ученые записки Пермского государственного университета им. А. М. Горького № 146. Пермь.: 1966. С. 21–34.
- Второва А.И., Мякишева Н.В. Современные особенности водного баланса озера Смолино // «Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы III международной конференции (г. Казань, 20–23 мая 2025 г.)». Казань: издательство Академия наук РТ, 2025. С. 266–270.
- Мякишева Н.В., Головань Е.В., Орлов Д.А. Уровенный режим Ладожского озера в современных условиях // «Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы III международной конференции (г. Казань, 20–23 мая 2025 г.)». Казань: издательство Академия наук РТ, 2025. С. 292–298.
- Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. СПб.: РГГМУ, 2009. 159 с.
- Рожков В.А., Трапезников Ю.А. Вероятностные модели океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 270 с.
- Филатов Н.Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер севера европейской территории России / Л.А. Руховец, Л.Е. Назарова, Л.П. Георгиев, Т.В. Ефремова, Н.И. Пальшин // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 34. С. 48–55.

УДК 556.54

ВОДНЫЙ РЕЖИМ И ПОТЕРИ СТОКА В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ВОЛГИ

Горелиц О.В.¹, Сапожникова А.А.¹, Ермакова Г.С.¹, Мигунов Д.А.^{1,2}

¹Государственный океанографический институт им.Н.Н.Зубова, Москва, Россия,

²Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова, Москва, Россия
gorelits@mail.ru

Аннотация. На фоне продолжительного снижения уровня Каспийского моря особое значение приобретает исследование современного водного режима и распределения стока в дельтах впадающих рек. В 2025 г. уровень моря достиг наиболее низких отметок за 190-летний период инструментальных наблюдений. В условиях климатических изменений и снижения уровня моря дана современная оценка водного режима дельты Волги и динамики потерь стока, в том числе вследствие увеличения площади суши дельты и отмелой зоны устьевого взморья Волги.

Ключевые слова: дельта Волги, уровень моря, водный режим, потери стока, устьевое взморье.

В последние десятилетия наблюдается устойчивое снижение уровня Каспийского моря. По данным наблюдений на морской береговой наблюдательной сети Росгидромета в 2025 г. уровень моря достиг минимальных отметок за весь период инструментальных наблюдений. В ГОИНе восстановлен полный ряд среднемесячных значений уровня моря с 1837 г. по настоящее время. Привязка всех имеющихся данных к единым высотным отметкам по МГ Махачкала и приведение к современному нулю поста -28.0 м БС выполнено с учетом работ Б.А. Аполлова, И.Н. Лукина, З.К. Абузярова, Е.С. Нестерова и др. (Аполлов, 1956; Лукин, 1961; Абузяров, 2011; Водный баланс..., 2016). В период 2006–2025 гг. зафиксировано наиболее быстрое и продолжительное падение уровня моря, средняя скорость которого составила 12 см/год. В последние 5 лет – 2021–2025 гг. – это среднее значение превысило 20 см/год, за 2025 г. снижение достигло 26 см/год, что близко по величине к скорости падения уровня в 1930-е годы.

В условиях современных климатических изменений в прикаспийском регионе и в целом на обширной территории водосборного бассейна Каспийского моря необходимы детальный учет речного стока впадающих рек и оценка его возможных потерь в устьевых областях ниже замыкающих створов.

85% суммарного стока рек, впадающих в море, составляет сток Волги. Поэтому вопросы современного водного режима дельты Волги и отмелой зоны устьевого взморья представляют интерес для этого исследования. Средний многолетний объем стока в вершине дельты Волги в период после зарегулирования (1961–2024 гг.) – 244 км³/год. В последние 20 лет в бассейне Волги наблюдается относительно маловодный период, средний годовой объем стока в вершине дельты в 2006–2024 гг. составил 230 км³/год. На фоне значительных многолетних и межгодовых колебаний стока значимой расходной составляющей водного баланса устьевой области Волги являются естественные потери стока и безвозвратное водопотребление.

Вопросу оценки потерь стока в дельте Волге посвящены десятки работ. Для представления о диапазоне величин потерь, полученных в XX в. многими авторами с использованием различных методов и подходов, приведем сводную таблицу, включающую основные результаты (табл. 1).

Сейчас для оценки естественных потерь стока в дельтах рек применяется широкий спектр методов, расчетных формул и моделей, используются современные открытые массивы метеорологических данных, базы данных о гидрологическом режиме, параметрах постилающей поверхности, цифровые модели рельефа и ДДЗЗ. Для характеристики безвозвратного изъятия стока применяются данные о водопользовании.

Таблица 1. Потери стока в дельте Волги (ДВ) и Волго-Ахтубинской пойме (ВАП) по результатам исследований, выполненных в 1930-1990-х гг. до и после зарегулирования стока.

Автор, год публикации	Потери стока, км ³ /год	Диапазон, км ³ /год	Режим стока
Д.Л. Соколовский, 1934	9.0 (ДВ+ВАП)		Естественный
Г.Р. Бергман, 1935	5.0 (ДВ)		
В.Н. Кузин, 1939	3.23 (ДВ) + 2.8 (ВАП)		
Б.А. Аполлов, 1939	3.1 (ДВ)		
С.С. Байдин, 1956, 1960	9.0 (ДВ) + 4.0 (ВАП)		
С.С. Ремизова, 1964	7.0 (ДВ)	4.4...9.7	Зарегулированный
А.П. Бочков, 1967	10.0 (ДВ)		
В.С. Рыбак, 1970, 1976	7.7 (ДВ)	6.1...10.5	
И.А. Шикломанов, 1974, 1979	10.8 (ДВ)	7.7...14.7	
В.С. Голубев..., 1993, 1995	9.12 (ДВ) + 2.7 (ВАП)	7.8...9.7	
Среднее	7.4 (ДВ) + 3.4 (ВАП)		

Для исследования динамики потерь стока, расчетов и дальнейшего анализа в работе использованы следующие источники информации:

- данные наблюдений на метеостанциях – Научно-прикладной справочник «Климат России» ВНИИГМИ-МЦД (*температура воздуха, влажность воздуха, скорость и направление ветра и др.*) - <https://aisori-m.meteo.ru>
- открытые интерполированные сеточные данные высокого разрешения – CRU TS V4.09 – High-resolution gridded datasets of Climatic Research Unit - <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>
- Реанализ: ERA5-Land <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>
- Информационная централизованная база данных основных гидрологических характеристик устьевых областей рек – ФГБУ «ГОИН»
- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов АИС ГМВО <https://gmvo.skniivh.ru/>
- Данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) и глобальные цифровые модели рельефа.

Потери стока в дельте Волги в естественных условиях зависят от параметров половодья (объем, продолжительность, максимальные уровни и др.) и от метеорологических условий (испарение, осадки, направление и скорость ветра, температура и влажность воздуха). Потери определяются также площадью и продолжительностью затопления пойменных территорий в дельте.

В условиях каскадного регулирования и внутригодового перераспределения стока максимальные расходы и уровни, продолжительность половодья снижаются, а, следовательно, уменьшаются площади затопления в центральной части дельты, с водной поверхности которых обычно происходит активное испарение.

В XXI в. вследствие снижения уровня Каспийского моря увеличиваются площади суши в низовьях дельты в результате пассивного выдвижения ее морского края и отступления границы отмелей зоны устьевого взморья. Эти процессы также обуславливают изменение потерь стока на испарение с территорий, которые ранее были покрыты водой.

Результаты исследований, выполненных коллективом под руководством В. Н. Михайлова (Михайлов, 1986; Михайлов, 2006; Устья рек..., 2013) показали, что

величина потерь на испарение в дельтах рек Каспийского моря близка к величине испаряемости (потенциальное испарение).

На основе открытых массивов данных *CRU TS V4.09* рассчитаны годовые величины испаряемости и годовые суммы осадков для дельты Волги с 1900 г. по настоящее время и получены значения видимого испарения. Анализ результатов показал, что, при относительном постоянстве (либо незначительном росте) годовых сумм осадков, с конца 1990-х гг. наблюдается резкий рост потенциального испарения от средних годовых значений 1035 мм в 1960-1990-х гг. до 1200 мм в последнее десятилетие 2015–2024 гг., в отдельные годы эта величина достигала 1260 мм.

Анализ данных наблюдений за направлением и скоростью ветра на метеостанциях, расположенных в дельте Волги и на устьевом взморье, подтвердил результаты исследований, выполненных коллективом под руководством Н. А. Дианского (2020), которые показали изменение параметров атмосферной циркуляции в прикаспийском регионе с конца 1990-х гг. Преобладание переноса горячих и сухих воздушных масс с ветрами восточной четверти обусловило существенный рост потерь в дельте Волги в этот период.

Для оценки изменений площади суши в дельте Волги в XXI в. использованы ДДЗ3 *Sentinel-2*, *Landsat-8* в условиях осенней межени 2006 и 2024 гг. При близких расходах воды в вершине дельты средний месячный уровень моря в сентябре 2006 г. составлял -26.82 м БС, а в сентябре 2024 г. -28.90 м БС. Анализ ДДЗ3 показал выдвижение морского края дельты и значительный рост площади островов на устьевом взморье Волги. Общее увеличение площади суши в пределах устьевой области Волги по приближенным оценкам составило 2850 км².

На основе полученных результатов выполнена оценка динамики годовых величин потерь стока в устьевой области Волги в зависимости от объемов стока, температуры воздуха и преобладающего направления и скорости ветра, а также сезонной динамики в годы разной водности. Значения, осредненные для периодов естественного и зарегулированного стока на рассматриваемой площади дельты $F_d=11000 \text{ км}^2$, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка годовых потерь стока в дельте Волги в XX-XXI вв. по периодам.

Период, режим стока	Потенциальное испарение, мм/год	Осадки, мм/год	Потери стока, мм/год	Потери, км ³ /год $F_d=11000 \text{ км}^2$
1901-1960 гг. Естественный режим	1013.9	209.7	804.2	8.85
1961-2000 гг. Зарегулированный режим – XX век	1038.4	218.0	820.4	9.02
2001-2024 гг. Зарегулированный режим – XXI век	1134.0	221.0	913.0	10.05

В современных условиях роста антропогенной нагрузки на водные ресурсы также необходимо оценивать потери на безвозвратное водопотребление. Расчеты, проведенные для водохозяйственных участков в пределах дельты Волги, показали, что за период 2010–2024 гг. средний годовой забор воды на различные промышленные, сельскохозяйственные и коммунальные нужды составляет 0.638 км³/год, безвозвратно теряется – 0.424 км³/год, что составляет не более 0.2% годового объема стока Волги в вершине дельты.

В заключение отметим, что в работах 1960–1990 гг. (Байдин, 1962; Рыбак, 1973; Шикломанов, 1979) возможная величина потерь в дельте Волги от ее вершины до морского края была принята в среднем за 3–4% годового объема стока в вершине дельты.

Оценка динамики потерь стока в дельте Волги в 1900–2024 гг., выполненная авторами, показала существенную изменчивость этой величины в различные периоды, рост потерь в последние десятилетия в целом и до 11–12 км³/год в отдельные годы.

На фоне продолжающегося снижения уровня Каспийского моря необходимы специализированные исследования изменения потерь стока на участках отмелей зоны устьевого взморья, которые ранее были покрыты водой, и на островах, площадь которых увеличивается.

Список литературы:

- Абузьяров З.К., Нестеров Е.С. Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 5–23.
- Аполлов Б.А., Федорова Е.И. Исследования колебания уровня Каспийского моря // Труды ИОАН. 1956. Т. 15. С. 72–228.
- Байдин С.С. Сток и уровни дельты Волги. М.: Гидрометеиздат, 1962. 337 с.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря / под ред. Е. С. Нестерова. М.: Триада лтд., 2016. 378 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.
- Лукин И.Н. Каталог уровенных наблюдений гидрометеорологических станций и постов, расположенных на Каспийском море. М.: Гидрометеиздат, 1964. 131 с.
- Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 280 с.
- Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Михайлова М.В. Баланс воды и наносов в устьях рек // Маккавеевские чтения – 2005. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. С. 47–64.
- Рыбак В.С. Потери стока в Волго-Ахтубинской пойме и дельте Волги // Труды ГОИН. 1973. Вып. 116. С. 104–112.
- Шикломанов И.А. Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 302 с.
- Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления / под ред. В.Н. Михайлова. М.: ГЕОС, 2013. 703 с.

УДК 528.852.8

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И МОРФО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОДОЕМОВ РОССИЙСКИХ СЕКТОРОВ
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

Домнин Д.А.¹, Коротаева Н.Н.²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия,
dmitriy.domnin@atlantic.ocean.ru

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

Аннотация. В прибрежной зоне моря и внутренних морских акваторий располагаются особые водоемы, которые имеют разное происхождение, в них происходят различные гидродинамические и гидрохимические процессы, но их объединяет нахождение в условиях постоянного взаимодействия вод суши и морских вод. В работе рассмотрены вопросы пространственного распределения, морфологические и гидрологические характеристики прибрежных водоемов Юго-восточной Балтики и Финского залива.

Ключевые слова: прибрежные озера, Калининградский залив, Финский залив, Балтийское море

Прибрежная зона Балтийского моря характеризуется повышенной динамичностью, склонностью к разному роду изменениям. Ее нестабильность находит свое отражение в изменении ширины пляжей, процессах разрушения береговых склонов, а также в формировании прибрежных водных объектов, их преобразованиях и исчезновении в результате штормовых явлений. Регионы России, находящиеся в юго-восточной части Балтийского моря (Калининградская область) и в районе Финского залива (Ленинградская область, г. Санкт-Петербург) имеют хорошо развитую гидрологическую систему, состоящую из сети водотоков, озер и прудов, множества каналов. Безусловно, основой системы являются крупнейшие водные объекты: реки Нева, Луга, Ладожское и Онежское озеро (на северо-востоке) и реки Неман, Преголя, озеро Виштынецкое (на юго-востоке). Особенностью этих географических районов является то, что они являются частью прибрежной зоны моря и здесь располагаются особые водные объекты, прибрежные водоемы (прибрежные/морские озера (Измайлова, 2018), *coastal lakes* (англ.) (Oertel, 2005)), которые имеют разное природное и антропогенное происхождение, а их гидрологические и экологические характеристики определяются условиями постоянного взаимодействия вод суши и морских вод (Краснова, 2021, Domnin et al., 2024). Знания об особенностях их физико-географических, морфометрических, гидрологических или гидрохимических характеристик, кроме фундаментального значения, лежат в основе ведения хозяйственной деятельности. Например, прибрежные водоемы могут быть пригодны для разведения рыб, обитающих в водах с низкой соленостью, или быть объектами рекреационного использования.

Настоящая работа преследует цель рассмотреть вопросы пространственного распределения, морфологические и гидрологические характеристики прибрежных водоемов Юго-восточной Балтики и Финского залива.

В пределах всей юго-восточной Балтики (Литва, Россия (Калининградская область) и Польша) было выявлено 44 прибрежных водных объекта, как естественного происхождения (озера), так и природно-антропогенного (обводненные карьеры). Из них, наибольшее количество находится на территории Калининградской области – 25 водоемов, остальные 13 объектов находится в пределах побережья Польши и 6 – в Литве. На побережье Финского залива анализировались водные объекты только в пределах российских территорий. Здесь всего было выделено 16 водных объектов, которые можно отнести к прибрежным озерам.

Стоит заметить, что преобладающее количество озер являются безымянными, не имеющими официально закрепленных названий. Крупные прибрежные водные объекты используются в рекреационных целях, для ведения рыбного хозяйства или же использования

в качестве дополнительного источника питьевого водоснабжения. Соответственно, подобное антропогенное воздействие вызывает интерес в изучении его влияния на биоту, свойства вод и их качество.

Используя собранные морфометрические данные, водные объекты были ранжированы по классификации П. В. Иванова на очень большие площадью зеркала свыше 1000 км², большие (101–1000 км²), средние (10–100 км²), малые (1–10 км²), очень малые (0.1–1 км²), озерки (менее 0.1 км²) (Иванов, 1948).

В Калининградской области, наибольшую часть водоемов можно характеризовать как озерки (14 шт., 0.01–0.09 км² по площади акватории), также отмечается наличие очень малых (8 шт., 0.2–0.7 км²), и малых (3 шт., 1.1–1.3 км²) объектов (рис. 1). Крупнейшими из них можно считать пруд Янтарный, площадью 1.2 км², озеро Форелевое – 1.1 км² и систему, состоящую из двух озер полуострова Балъга, площадью 1.4 и 0.7 км² (Домнин и др., 2023; Коротаева, 2025).

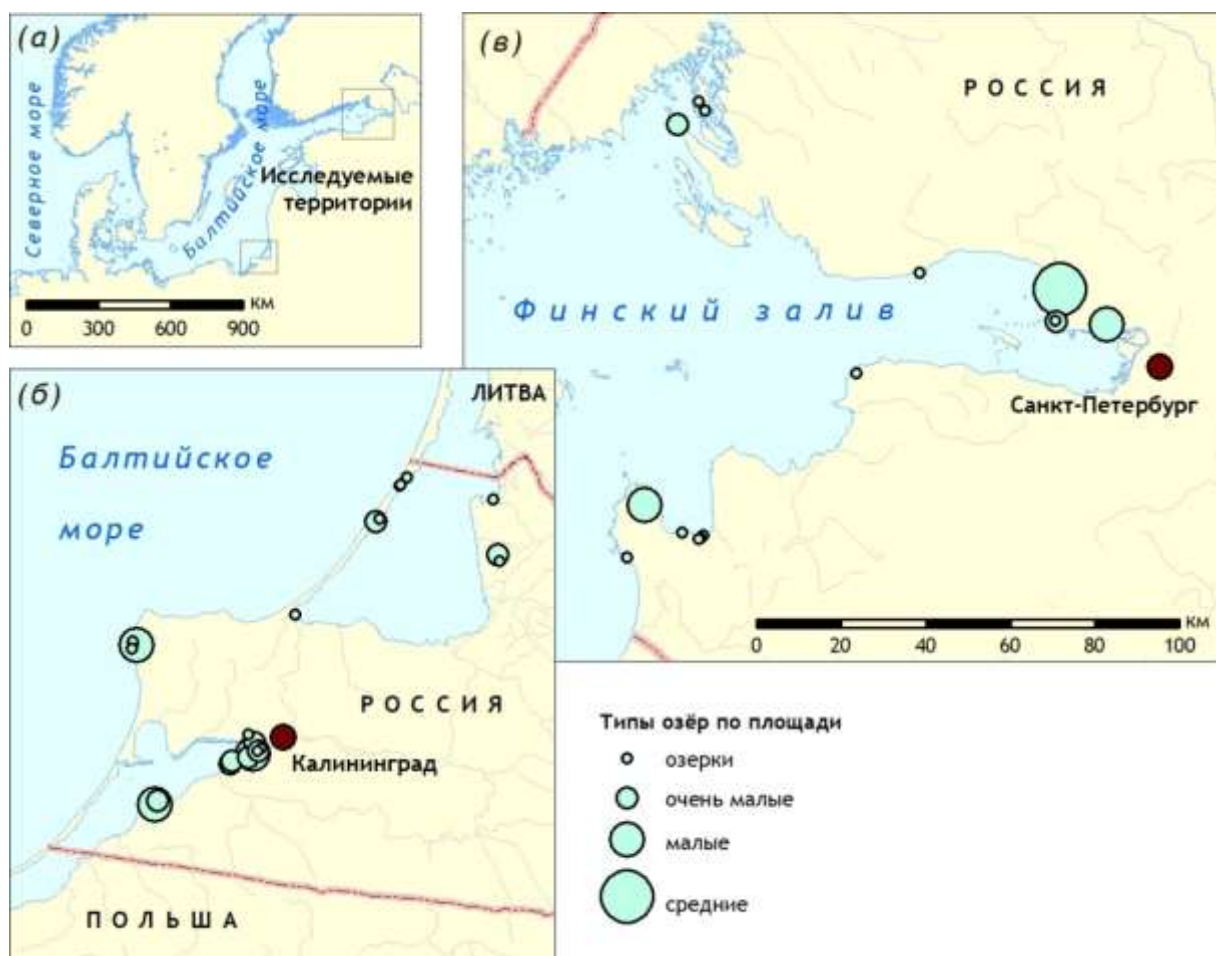


Рис. 1. Распределение прибрежных озер российских секторов (а) юго-восточной Балтики (б) и Финского залива (в) в соответствии с ранжированием по площади поверхностного зеркала

На вероятность проникновения соленых вод в пресноводный водоем также непосредственное влияние оказывает его удаленность от моря или залива и наличие постоянного водотока, их соединяющего. Кроме того, взаимодействие с морской акваторией может осуществляться и посредством гидравлического проникновения солоноватых вод через существующие естественные и искусственные дамбы. На территории Калининградской области наименее отдаленный от моря/залива во всей Юго-восточной Балтике (озеро, прилегающее к основанию Куршской косы, удаленность – 7 м), а наиболее отдаленные – Тавские озера, более 5 км – соединены речной сетью. В районе Финского залива, наиболее близко к соленым водам, на расстоянии около 12 м, расположен безымянный водоем. Среди

самых отдаленных прибрежных озер отметим Сестрорецкий разлив (более 2 км) и Липовское (более 1.9 км). Подобные объекты, располагающиеся на значительных расстояниях, были учтены ввиду наличия крупных постоянных водотоков, соединяющих их с водами моря/залива.

Протяженность объектов вдоль побережья Калининградской области варьируется от 110 м до 2 км (крупнейшее – озеро Форелевое); вдоль побережья Финского залива – от 124 м до 5.5 км (крупнейшее – Сестрорецкий разлив). Измеренная ширина водоемов (относительно перпендикулярно береговой линии) в Калининградской области изменяется от 40 м до 1.4 км (крупнейшее – озеро Западное на п-ве Бальга), на побережье Финского залива – от 36 м до 6.1 км (крупнейшее – озеро Липовское) (табл. 1).

Таблица 1. Крупнейшие прибрежные водоемы российских секторов Балтийского моря

Название водоема	Тип	Происхождение	Площадь, га	Макс. глубина, м	Фоновая минерализация, ‰	Макс. минерализация, ‰
Озера побережья юго-восточной Балтики						
Западное	озеро	флювиальное	145.8	н/д	1.1	н/д
Янтарный	обводненный карьер	искусственное	120.4	24	0.5	0.7
Форелевое	обводненный карьер	искусственное	111.5	21	3.0	3.6
Марийское	озеро	флювиальное	78.9	н/д	0.3	н/д
Восточное	озеро	флювиальное	75.2	н/д	1.1	н/д
Озера побережья Финского залива						
Липовское	озеро	ледниковое	532.1	16.9	3.8	н/д
Лахтинский разлив	озеро	лагунно-лиманное	149.3	8.3	н/д	н/д
Сестрорецкий разлив	пруд	искусственное	1087.2	5.5	н/д	н/д

Озера побережья юго-восточной Балтики

На западном морском побережье расположена *группа прибрежных водоемов Самбийского полуострова*, представляющие собой обводненные карьеры, образовавшиеся на месте добычи янтаря в результате затопления выемок подземными и морскими водами. Вся система состоит из пруда Янтарного и трех пляжевых озер (Домнин и др, 2023). Другой системой прибрежных водоемов является *группа обводненных карьеров северо-восточного побережья Калининградского залива*, в которую входят несколько отдельных водоемов, расположенных вдоль Калининградского залива и отчлененных от него и между собой узкими перешейками и дамбами (Берникова и др., 2005). Гидрологическая связь, в том числе с заливом, осуществляется посредством нескольких каналов и путем инфильтрации. Относительно новыми прибрежными водоемами являются гидрогенные *озера полуострова Бальга*, которые образовались на месте заболоченных земель, находящихся ниже уровня Калининградского залива в результате прекращения работы осушительной станции. Вокруг Куршского залива также находятся прибрежные озера: на Куршской косе – *озера Чайка, Лебедь, Изумруд*, на восточном побережье – *Марийские озера*, образованные в ответвлении реки Товарной.

Озера побережья Финского залива

Несмотря на то, что лишь одно Липовское озеро является соленым (Сапелко и др., 2023), т.е. имеет прямую взаимосвязь с Финским заливом, другие отмеченные водоемы такую связь могут иметь, но при возникновении особых гидрометеорологических условий, как ветровые нагоны и подъем уровня. В этой части морского побережья можно выделить три группы прибрежных озер. В *группе озер Кургальского полуострова* кроме уже упомянутого

Липовского озера, на затопляемом побережье находятся еще 5 озерков. *Озера северного побережья Невской губы* относительно крупные, и связаны с гидротехническим использованием речных систем (Макарова, 2018). Северное побережье Финского залива сложено каменистыми берегами, что затрудняет образование относительно крупных прибрежных озер, поэтому в условную *группу Выборгских озер* входят озера и малые озера, для которых необходима дополнительная проверка возможностей взаимосвязи с морской акваторией.

Настоящая работа проведена в рамках темы государственного задания № FMWE-2024-0025.

Список литературы:

Берникова Т.А., Дубравин В.Ф., Цупикова Н.А., Шибаета М.Н., Уманский С.А. Экологическое состояние озера Форелевого // Известия Калининградского государственного технического университета. 2005. № 7. С. 30–34.

Домнин Д.А., Михневич Г.С., Вершинин Д.С., Карманов К.В., Гмыря Е.И. Условия взаимодействия морских и пресных вод в системе прибрежных обводненных карьеров Юго-Восточной Балтики // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 3. С. 467–485. DOI:10.26907/2542-064X.2023.3.467-485

Иванов П.В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Бюл. ЛГУ. 1948. № 21. С. 29–36

Измайлова А.В. Озера России: закономерности распределения, ресурсный потенциал. СПб.: Папирус, 2018. 288 с.

Коротаева Н.Н. Морфометрические характеристики прибрежных озер Калининградской области // Океанологические исследования: материалы XI Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием, 26 – 30 мая 2025 г., Владивосток, Россия. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2025. С. 66–67. DOI:10.62994/b7314-9428-9558-w

Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России: Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 322–333. DOI:10.31857/S0321059621030093

Макарова С. В. Экологическое состояние водохранилища Сестрорецкий Разлив: прошлое и настоящее // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. 4 (76). С. 61–69.

Сапелко Т.В., Лапенков А.Е., Газизова Т.Ю., Русанов А.Г., Кузнецов Д.Д., Гузиватый В.В. Первые результаты экспедиционных работ на озерах Кургальского полуострова (южное побережье Финского залива) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2023. 10. С. 395–400. DOI:10.24412/2687-1092-2023-10-395-400

Domnin D., Kilesa A., Kulmanov K., Rachipa V. Response of hydrological characteristics for local coastal water bodies of the South-Eastern Baltic to extreme weather events in autumn–winter 2023/2024 // Pure and Applied Geophysics. 2024. 181. С. 2403–2420. DOI:10.1007/s00024-024-03526-9

Oertel, G.F. Coastal Lakes and Lagoons. / Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Science Series. Schwartz, M.L. (eds) Springer, Dordrecht. DOI:10.1007/1-4020-3880-1_81

УДК 556

ЗИМНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК ЮГА ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

Евтеева О.В., Дмитриева В.А.

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия,

oksana.evteeva2004@gmail.com

Аннотация. Целью работы является рассмотрение взаимосвязи сроков появления ледяных образований и установления ледостава при текущем возрастании поверхностной температуры воды на примере рек юга Воронежской области. В качестве основных характеристик для исследования выбраны температура воды в июле, дата появления и продолжительность устойчивого ледостава. Была установлена неоднозначная реакция рек на климатические изменения.

Ключевые слова: ледовый режим, температура воды, бассейн Верхнего Дона.

Образование ледовых явлений, их сроки и продолжительность подвержены воздействию ряда факторов, к которым относятся условия теплообмена водной массы с атмосферой и подстилающим ложем, морфологические и гидравлические особенности рек. Однако, тенденции к глобальному росту приземной температуры воздуха в совокупности с антропогенным влиянием вносят существенные изменения в термический режим поверхностных вод, что сопровождается трансформацией ледового режима рек умеренных широт. Отличительными чертами описанных выше изменений являются более поздние даты формирования ледяных образований и сокращение периода устойчивого ледостава вплоть до его полного отсутствия и сдвиг на более поздние сроки (Дмитриева, 2018; Дмитриева, Евтеева, 2025).

В данной статье анализируется отклик трех различных по водности рек в фазе зимнего гидрологического режима на климатические изменения, в том числе малых и средних водотоков, испытывающих наибольшую чувствительность к этим процессам. Для оценки доли влияния различных факторов на ледовый режим были взяты гидрологические посты, расположенные в непосредственной близости друг от друга, что позволило бы минимизировать различия температур воздушной и водной сфер.

Исследование базируется на данных наблюдений по гидрологическим постам р. Дон – г. Павловск, р. Битюг – г. Бобров, р. Подгорная – г. Калач, и метеорологическим станциям: г. Лиски, г. Павловск и г. Калач, расположенных в пределах Воронежской области на разнородных участках рельефа. Сведения заимствованы из гидрологических ежегодников по 1992 г., с 1993–2019 г. из архивных фондов Центрально-Черноземного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. В работе рассмотрены следующие характеристики: дата появления ледяных образований, продолжительность устойчивого ледостава, температура воздуха холодного периода, максимальная температура июля. Для анализа и сопоставления перечисленных выше параметров на рубеже веков были взяты 2 периода: 1950–1980 гг. и 1981–2019 гг.

Современные климатические процессы, начиная с 1980-х г., характеризуются стабильным ростом температуры приземного слоя Земли. Так, за период с 1976 по 2020 гг. наблюдается устойчивый тренд ее нарастания со средней интенсивностью $0.18^{\circ}\text{C}/10$ лет. Следует подчеркнуть, что только за этот рассматриваемый период совокупный рост температуры воздуха равен 0.8°C (Третий..., 2022). Данная тенденция имеет свои региональные особенности, так для Воронежской области разница между среднегодовыми температурами воздуха текущего столетия и последнего десятилетия предшествующего века составляет $0.9\text{--}1.3^{\circ}\text{C}$.

Воздействие климатических изменений на речные системы проявляется, в первую очередь, в трансформациях их термического и ледового режимов. Ключевым итогом потепления выступает удлинение периода открытого русла потока, что напрямую связано с

более поздним формированием ледового покрова в совокупности с его более ранним разрушением. Однако реакция температуры водной массы на описанные выше процессы нарастания температуры приземного слоя атмосферы не является прямой и однородной. Формирование теплового баланса водного объекта – сложный процесс, определяемый взаимодействием воды с атмосферой и грунтами, поэтому долгосрочная динамика максимальных температур воды не демонстрирует такого же выраженного и устойчивого тренда на повышение, как динамика температуры воздуха (Дмитриева, Бучик, 2021).

Так, анализ термического режима показал синхронность в увеличении температуры водной массы и воздуха у гидрологических постов р. Дон – г. Павловск и р. Битюг – г. Бобров, тогда как у р. Подгорная – г. Калач выявлена разнонаправленная динамика этих характеристик (табл. 1).

Таблица 1. Динамика ледово-термических показателей на гидрологических постах юга Воронежской области.

Гидрологический пост	Период, гг.	Средняя температура воды (июль), °С	Средняя дата появления ледовых явлений	Средняя продолжительность устойчивого ледостава, сутки
р. Битюг – г. Бобров	1950–1980	25.6	20.11	100
	1981–2019	26.0	26.11	40
р. Дон – г. Павловск	1950–1980	26.1	26.11	91
	1981–2019	26.7	02.12	37
р. Подгорная – г. Калач	1950–1980	26.1	06.11	78
	1981–2019	24.3	13.12	7

Появление первичных ледяных образований связано с охлаждением водных масс до 0°C, которое в свою очередь обусловлено процессами теплообмена водной массы с окружающей средой. Ключевой составляющей теплообмена является запас тепла, накопленный водным объектом к моменту образования льда и определяемый температурой воды в потоке и его расходом (Ресурсы..., 1973).

В рамках исследования влияния климатических изменений и описанных выше механизмов на ледовый режим оценивалось на основе анализа динамики двух базовых характеристик: дат формирования устойчивого ледостава и его продолжительности. Данные показатели наиболее наглядно отражают результат совокупного воздействия термического режима водного объекта, температуры воздуха.

Анализ материалов, приведенных в табл. 1, показал четкий тренд на смещение сроков появления ледяных образований на более поздние даты. Однако, степень этого смещения оказалась неоднозначна. Так, на двух исследуемых гидрологических постах р. Дон – г. Павловск и р. Подгорная – г. Калач сроки сместились с конца ноября на начало декабря. Для реки Битюг сдвиг оказался наименее выраженным и составил 6 суток, что, вероятно, может быть объяснено более северным географическим положением и равнинным характером водосбора.

Более существенные изменения выявлены в продолжительности устойчивого ледостава (см. табл. 1). Для реки Дон у города Павловск средние значения этого показателя меняются в диапазоне 91 суток за период 1950–1980 гг. до 37 суток за период 1981–2019 гг. Для гидрологического поста р. Битюг – г. Бобров средняя продолжительность за рассматриваемый временной диапазон сократилась с 100 до 40 суток. Наиболее критическая ситуация сложилась на реке Подгорная, где среднее значение данной ледовой характеристики уменьшилось с 78 до 7 суток. Что фактически указывает на постепенное нарастание безледного периода на реках Донского бассейна в современную эпоху. Данное аномальное событие в чертах формирования ледового режима на водотоках отмечается практически повсеместно с 2017 года на территории Центрального Черноземья (Дмитриева, Евтеева, 2025).

Для выявления ведущих факторов, оказывающих наибольшее влияние на зимний гидрологический режим рек юга Воронежской области, был выполнен корреляционный анализ, установивший значительные различия рассматриваемых речных потоков. Для рек Дон и Битюг подтверждена доминирующая роль температуры воздуха: выявлена умеренная обратная связь между продолжительностью ледостава и температурой воздуха ($r = -0.67$ и $r = -0.59$ соответственно). При этом влияние температуры воды в июле на анализируемую характеристику ледового режима выражено слабо ($r = -0.22$ и $r = -0.06$ соответственно). Это может свидетельствовать о вторичном влиянии летнего прогрева воды на ледовый режим крупных и средних рек с широкой долиной.

Иная зависимость наблюдается на реке Подгорная, где была выявлена положительная корреляция между температурой воды в июле и продолжительностью ледостава ($r = 0.59$) при сохранении отрицательной связи с температурой воздуха ($r = -0.59$) (рис. 1, 2). Для исключения ложной зависимости между двумя расчетными характеристиками была выполнена проверка на исключение влияния третьей переменной, в нашем случае температуры приземного слоя атмосферы. Однако, она показала, что частная корреляция между температурой воды летом и продолжительностью ледостава составила 0.53, что отрицает влияние климатического фактора на нетипичную зависимость. Данная особенность, вероятно, обусловлена сочетанием узкой долины, значительного превышения водоразделов над днищами долин от 50–80 м и малой водности реки Подгорная, что способствует усилению роли локальных факторов и нарушает линейность климатических зависимостей.

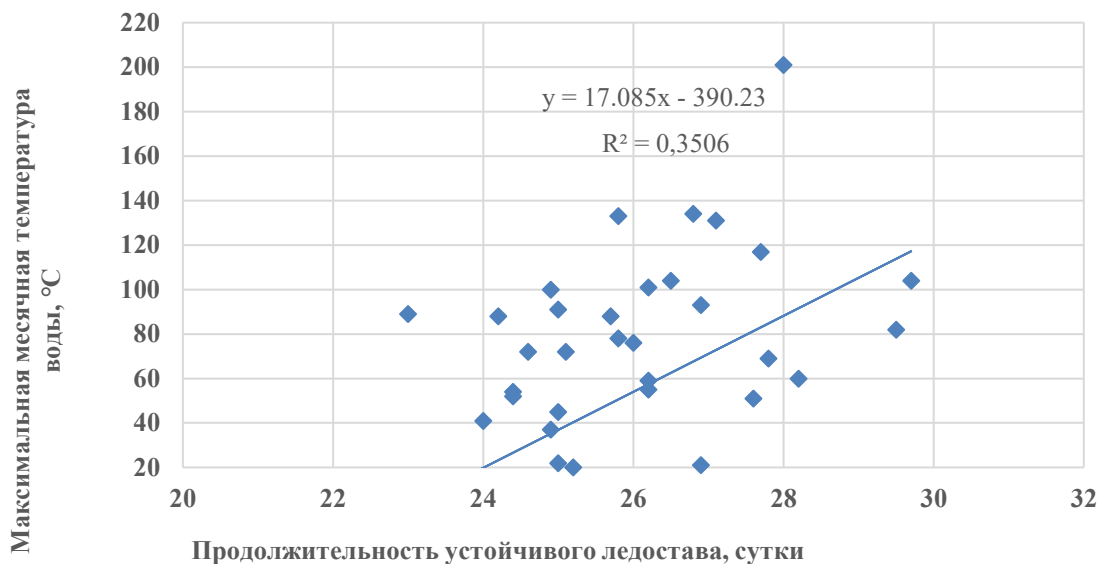


Рис. 1. Корреляция максимальной температуры воды и продолжительности устойчивого ледостава р. Подгорная – г. Калач за 1950–2019 гг.

Таким образом, полученные результаты отражают существенные изменения в зимнем гидрологическом режиме рек юга Воронежской области, которые выражаются в смещении дат начала ледообразования на начало декабря, за исключением реки Битюг, и постепенным сокращением устойчивого ледостава. Также подчеркивается роль орографических и морфометрических условий водосборов, модифицирующих долю влияния климатического фактора на ледовый режим водных объектов. Большие и средние реки равнинных территорий характеризуются более стабильными связями между ледовыми явлениями и температурой воздуха, когда как для малых рек более возвышенных районов характерна повышенная чувствительность к термическому режиму теплового периода времени.

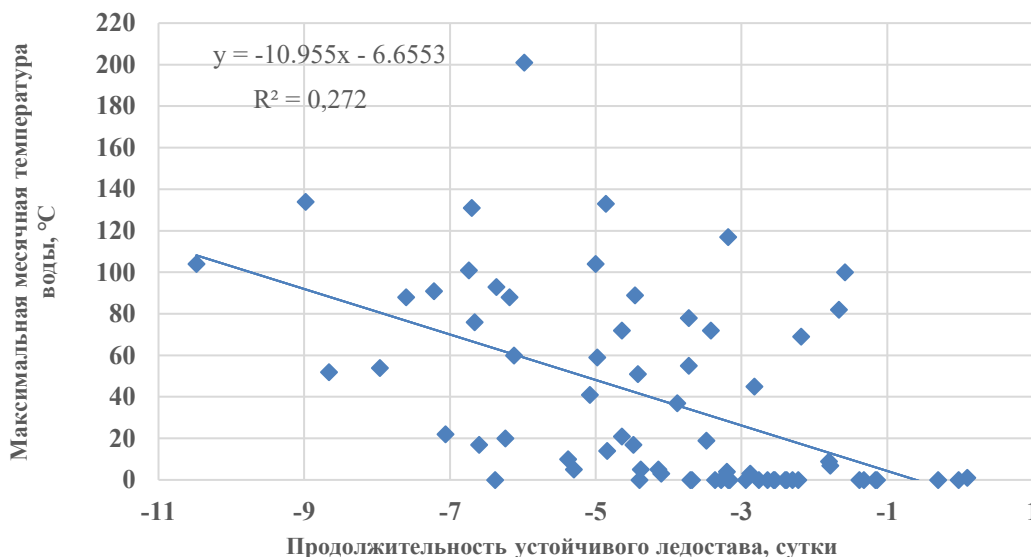


Рис. 2. Корреляция температуры воздуха и продолжительности устойчивого ледостава р. Подгорная – г. Калач за 1950–2019 гг.

Список литературы:

- Дмитриева В.А. Гидрологический режим рек Донского бассейна // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 77–84.
- Дмитриева В.А., Бучик С.В. Термический режим речных вод как ответная реакция на климатические процессы в бассейне Верхнего Дона // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27. № 1. С. 127–134.
- Дмитриева В.А., Евтеева О.В. Ледовый режим рек Донского бассейна на рубеже веков // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. 2025. № 4. С. 75-83.
- Ресурсы поверхностных вод СССР: монография / под ред. М. С. Протасьева. Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т. 7: Донской район. 459 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научные технологии, 2022. 124 с.

УДК 556.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ НАТУРНЫХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОДНОГО БАЛАНСА МАЛОГО ГОРНОГО ВОДОСБОРА НА ТЕРРИТОРИИ КРИОЛИТОЗОНЫ

Жунусова О.Р., Макарьева О.М., Нестерова Н.В.

Государственный гидрологический институт, Россия, zhun.oksana@gmail.com

Аннотация. Выполнена оценка водного баланса водосбора ручья Морозова (бассейн р. Колыма), расположенного в горной криолитозоне, на основе исторических и современных материалов наблюдений. Расчеты производились с использованием гидрологической модели «Гидрограф» с учетом данных современных наблюдений температуры пород на термометрической скважине. Показано, что привлечение новых геокриологических данных позволяет улучшить качество моделирования речного стока и повысить точность оценки элементов водного баланса. Получена количественная оценка слоя воды, аккумулирующейся ежегодно в виде гольцового льда в толще пород. Результаты могут быть использованы при анализе изменений водных ресурсов и решении задач прогнозирования стока в условиях изменения климата.

Ключевые слова: водный баланс, криолитозона, гольцовый лед, криогенное перераспределение влаги, ручей Морозова.

Введение

Оценка водного баланса малых горных водосборов криолитозоны затруднена вследствие недостатка наблюдений. В то же время для этих территорий характерно широкое распространение криогенных процессов, оказывающих существенное влияние на формирование речного стока. Особую роль в формировании стока здесь играют ландшафты каменистых пустынь (т.н. гольцовые ландшафты), отличающиеся высокой проницаемостью пород, слабо развитым почвенно-растительным покровом, низким испарением, высоким коэффициентом стока, а также развитием процессов криогенного перераспределения влаги, связанных с инфильтрацией талых снеговых вод в переохлажденные грунты и образованием в них гольцового льда.

Ручей Морозова расположен в пределах горной криолитозоны бассейна реки Колымы и полностью покрыт крупнощебнистой осыпью. Исторические гидрометеорологические наблюдения на водосборе проводились в 1968–1997 гг. на Колымской воднобалансовой станции (КВБС) и включали данные по речному стоку, осадкам и температуре воздуха (Материалы наблюдений..., 1969-1998). После консервации многих пунктов КВБС в 1997 г. полноценных наблюдений на водосборе не велось за исключением геокриологических работ, проведенных в 1999–2001 гг. и 2004 г. (Банцекина, 2003; Михайлов и др., 2007). С 2020 г. авторами возобновлены наблюдения, включающие измерения уровней и расходов воды, жидких осадков и температуры пород на различных глубинах, что позволило актуализировать информацию о гидрологическом режиме водосбора.

Целью работы является оценка элементов водного баланса водосбора ручья Морозова (бассейн р. Колыма) за период 1997-2025 гг.

Материалы и методы

Оценка водного баланса выполнена с применением гидрологической модели «Гидрограф», адаптированной для условий распространения многолетнемерзлых пород. Модель ранее применялась для расчета стока на водосборах криолитозоны и показала удовлетворительные результаты (Макарьева и др., 2020; Нестерова и др., 2018; Nesterova et al., 2021).

В данном исследовании модель использовалась для расчета речного стока и основных компонентов водного баланса с учетом изменения запасов влаги, что важно для гольцовых

ландшафтов, так как значительная часть влаги аккумулируется в виде грунтового льда, обеспечивая межсезонное и межгодовое перераспределение влаги.

Моделирование стока осуществлялось за период наличия материалов исторических наблюдений 1968–1996 гг., а также за современный период 1997–2025 гг. В качестве входной метеорологической информации были использованы данные наблюдений на водосборе руч. Морозова, пропуски в которых восстанавливались по данным с близлежащей метеостанции Колымская с введением высотных поправок температуры, осадков и дефицита влажности воздуха. В качестве граничных условий использовались наблюдаемые значения температуры пород на глубине 15 м на термометрической скважине, пробуренной авторами в рамках расширения региональной сети мониторинга многолетнемерзлых пород Магаданской области (Макарьева и др., 2024) в непосредственной близости от границы водосбора.

Результаты и обсуждение

Параметризация модели выполнена на основе описаний Т. В. Банцединой (2003), материалов КВБС (Материалы наблюдений..., 1969–1998) и параметров из работы (Макарьева и др., 2020). Для верификации модели использовались данные наблюдений за температурным режимом пород, речным стоком, а также данные снегомерных съемок.

По результатам моделирования характеристик снежного покрова и сравнения их с наблюдаемыми данными были скорректированы зимние осадки, что позволило снизить неопределенность расчетов элементов водного баланса.

Для оценки адекватности моделирования температурного режима пород рассчитанные значения сравнивались с наблюдаемыми на термометрической скважине на разных глубинах (2022–2025 гг.). Средние рассчитанные значения критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (NS) (Nash, Sutcliffe, 1970) для всего периода наблюдений составили: 0.93 для глубины 1 м, 0.97–1.5 м, 0.93–2 м и 0.67 для глубины 4 м. Периоды начала оттаивания и промерзания в целом совпадают. Разница между рассчитанной и наблюдаемой мощностью сезонно-талого слоя для 2024 г. не превышает 0.1 м.

Использование новых данных о температуре пород существенно улучшило качество моделирования речного стока, повысив среднее значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа за исторический период моделирования 1968–1996 гг. с 0.52 до 0.68, что позволило повысить надежность оценок элементов водного баланса. Это свидетельствует о важной роли геокриологических данных при воспроизведении гидрологического режима гольцовых водосборов.

На рис. 1 приведено сравнение рассчитанных и наблюдаемых суточных гидрографов стока на примере 1992 г. (со значением NS, близким к среднему за 1968–1996 гг.), и 2025 г. Гидрографы в целом совпадают по фазе и амплитудам, что подтверждает адекватность моделирования как для исторических, так и для современных условий.

В табл. 1 приведены рассчитанные элементы водного баланса для исторического (1968–1996 гг.) и современного (1997–2025 гг.) периодов. Годовой слой стока за исторический период составил 438 мм, слой осадков – 515 мм, испарения – 82 мм. Рассчитанный среднемноголетний слой стока ниже наблюдаемого (451 мм) на 3%.

Для современного периода (1997–2025 гг.) компоненты водного баланса распределились следующим образом: сток – 451 мм, осадки – 519 мм, испарение – 77 мм. В целом структура водного баланса за рассмотренные периоды существенно не изменилась (рис. 1).

Дополнительно оценивался слой воды, аккумулирующейся ежегодно в виде гольцового льда, который определялся как разность между максимальной льдистостью толщ пород в период снеготаяния и значением льдистости, предшествующим этому периоду. Значения слоя гольцового льда в разные годы варьируются в диапазоне от 39 до 70 мм, а среднее значение за весь период моделирования (1968–2025 гг.) составляет 54 мм, что указывает на существенный вклад в структуру водного баланса гольцового водосбора. Слой льда за исторический (1968–1996 гг.) и современный (1997–2025 гг.) периоды составили 57 и 51 мм соответственно.

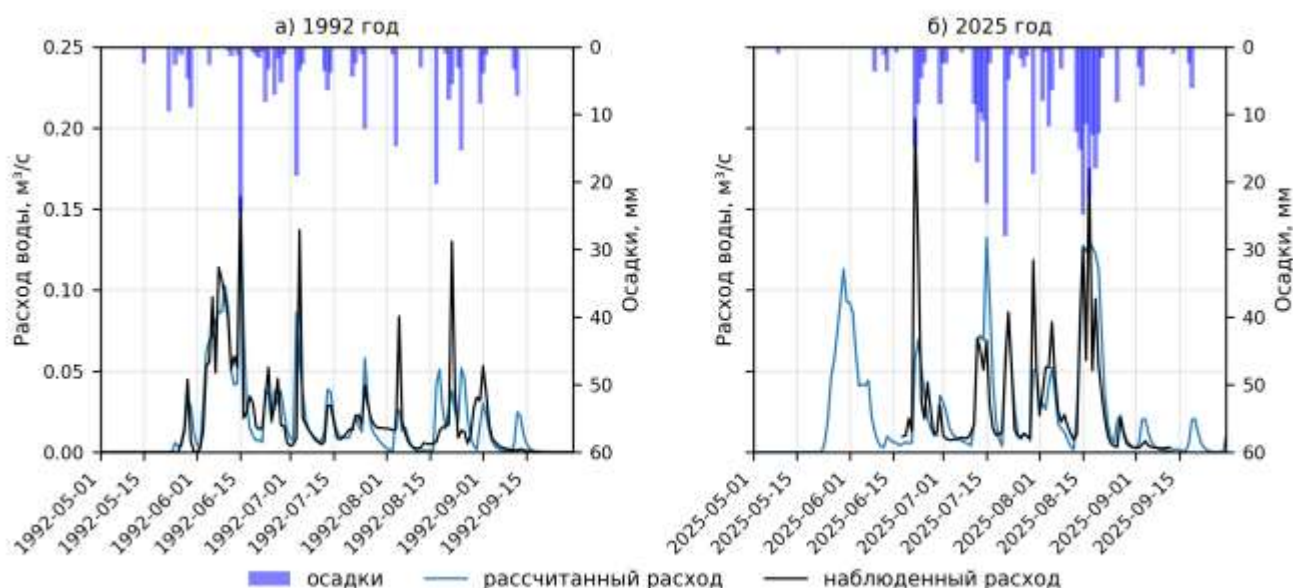


Рис. 1. Сравнение рассчитанного и наблюдаемого расходов воды для 1992 года (NS = 0.69) и для 2025 года (NS = 0.49)

Таблица 1. Рассчитанные элементы водного баланса.

Характеристика	Период	
	1968–1996	1997–2025
Слой стока, мм	438	451
Слой осадков, мм	515	519
Слой испарения, мм	82	77

Выполненная работа демонстрирует, что привлечение новых геокриологических данных наблюдений, несмотря на их локальный характер, повышает качество моделирования речного стока и оценки элементов водного баланса. Учет аккумуляции воды в виде гольцового льда позволяет уточнить величину межсезонного и межгодового перераспределения запасов влаги. Полученные оценки могут быть использованы при анализе изменений водных ресурсов и при решении задач прогнозирования стока в условиях изменения климата.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-10033, <https://rscf.ru/project/25-77-10033/>

Список литературы:

Банцеева, Т.В. Особенности гидротермического режима слоя сезонного протаивания крупнообломочных склоновых отложений в весенне-летний период: на примере верхнеколымского нагорья: диссертация ... кандидата географических наук: 25.00.08. Якутск, 2003. 137 с.: ил.

Макарьева О.М., Абрамов Д.А., Землянкова А.А., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Температура многолетнемерзлых пород Верхнеколымского нагорья по данным термометрических скважин за 2021–2022 годы // Криосфера Земли. 2024. Т. 28. № 3. С. 19–32. DOI:10.15372/KZ20240302 EDN: XJQOYL.

Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-

балансовой станции) // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 1. С. 43–56. DOI:10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56). EDN: UYVYJJ.

Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Моделирование и расчет характеристик максимального стока катастрофических дождевых паводков в зоне мерзлоты в условиях крайней недостаточности гидрометеорологической информации // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. 2018. С. 202–206. EDN: PQDZKF.

Материалы наблюдений Колымской воднобалансовой станции 1968–1997 гг. Магадан: Колымское УГКС. 1969–1998. Вып. 11–40.

Михайлов В. М., Банцеева Т. В., Ушаков М. В. Исследования термических характеристик рассредоточенного притока в горные реки криолитозоны // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 4. С. 57–64.

Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. Vol. 10. № 3. P. 282–290.

Nesterova N., Makarieva O., Post D.A. Parameterizing a hydrological model using a short-term observational dataset to study runoff generation processes and reproduce recent trends in streamflow at a remote mountainous permafrost basin // Hydrological Processes. 2021. Vol. 35. No. 7. P. e14278. DOI:10.1002/hyp.14278 EDN: EXABKZ.

УДК 556.5

КЛАССИФИКАЦИЯ РЕК КАРАБАХА ПО ВОДНОМУ РЕЖИМУ

Иманов Ф.А.¹, Иманов С.Ф.²

¹Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан, *farda_imanov@mail.ru*

²Научно-исследовательский и проектный институт «Суканал», Баку, Азербайджан

Аннотация. Выполнен анализ количественных показателей водного режима рек Карабаха с использованием кластерного метода. Уточнена существующая классификация и схема гидрологического районирования исследуемого региона по водному режиму рек. Каждый из ранее выделенных двух гидрологических районов разделены на два подрайона.

Ключевые слова: Карабах, водный режим, классификация рек, кластерный метод.

В гидрологическом режиме реки особое значение имеет ее водный режим, поскольку он характеризует ритмичность стока, поступающего в реку из бассейна. Информация о водном режиме рек необходима для решения многих практических задач: получения представления о характеристиках режима неизученных рек, реализации мер по защите от наводнений; оценки воздействия изменения климата на водный режим; определения экологического стока и т.д. Основными фазами водного режима являются весеннее половодье, дождевые паводки и меженные периоды.

М. И. Львович выполнил классификацию рек мира по источникам питания и выделил 38 типов рек с учетом их водного режима, 20 из которых включают реки бывшего СССР (Львович, 1974). Эта классификация стала первой, где использовались количественные показатели источников питания рек (<50, 50–80, >80%) (Фролова и др., 2021). В 2011 году эта классификация была обновлена, и для рек мира было добавлено еще 20 типов режима (Лукиянович, 2011). Известна также классификация рек Земного шара по водному режиму, выполненная Парде (Musy and Higy, 2010).

С учетом распределения годового речного стока по месяцам и сезонам, а также их источников питания реки Карабаха делятся на две группы (Рустамов, Кашкай, 1989):

1. Реки с весенне-летним половодьем;
2. Реки с весенним половодьем и дождевыми паводками в осенний период.

Первая группа включает реки, берущие начало на Карабахском вулканическом нагорье и Зангезурском хребте (Охчучай, Базарчай/Воротан, Акера, Тертер). Вторую группу образуют реки, текущие из Карабахского хребта (Хачинчай, Каркарчай, Кендаланчай, Куручай). Для водного режима рек первой группы характерны три основные фазы (осенне-зимняя межень, весеннее половодье и летняя межень). Осенне-зимняя межень охватывает период с сентября по февраль, и в этот период проходит 20–30% годового стока. Весеннее половодье начинается в марте и заканчивается в июне. На этот период приходится 50–60% годового объема стока. Летняя межень длится два месяца (июль-август), и в этот период сток составляет 10–20% от годового стока. В водном режиме второй группы рек выделяются четыре фазы: зимняя межень, весеннее половодье, летняя межень и осенние паводки. В период зимней межени (декабрь-февраль) доля стока небольшая (10–15% годового стока). В период весеннего половодья (март-июнь), доля стока увеличивается до 45–60%. Летняя межень длится три месяца (июль-сентябрь), и его доля в годовом стоке составляет 15–20%. Осенние паводки обычно проходят в октябре-ноябре (10–15%).

Целью данной работы является уточнение существующей классификации рек Карабаха с помощью кластерного анализа, который позволяет разделить объекты, характеризующиеся многочисленными признаками, на относительно однородные группы по одному или нескольким признакам.

Использованы данные 29 гидрологических постов и были выбраны четыре показателя водного режима рек:

1. Коэффициент паводочности (Кпав);
2. Коэффициент подземного питания реки (Кпп);

3. Средняя продолжительность маловодного периода (T_m);

4. Отношение среднееголетних минимальных летне-осенних и зимних расходов воды ($Q_{ло}/Q_3$).

Коэффициент паводочности определяется как отношение средних многолетних максимальных и годовых расходов воды. Коэффициент подземного питания реки показывает долю подземного стока в общем речном стоке. Средняя продолжительность маловодного периода определяется как сумма продолжительности летне-осеннего и зимнего меженьного периодов. Отношение среднееголетних минимальных летне-осенних и зимних расходов воды характеризует истощение стока в течение маловодного периода.

Рассматриваемые реки были разделены на кластеры на основе показателя их сходства. В качестве такого показателя использовалось евклидово расстояние, характеризующее расстояние между объектами в многомерном пространстве. Кластеры, выявленные в результате анализа, были представлены в виде дендрограммы. Для объединения небольших кластеров был применен метод Уорда (Ward) (Бурева, 2007). Дендрограммы были составлены в отдельности для каждого из четырех показателей и для всех показателей вместе.

Вначале были проанализированы закономерности распределения выбранных количественных показателей по территории. Рассмотрены зависимости этих показателей от средней высоты водосборного бассейна. Выявлена связь ($R^2=0.3426$) между коэффициентом паводочности (2.3–59.1) и средней высотой водосбора (1130–2970 м). С увеличением высоты коэффициент паводочности уменьшается. Коэффициент подземного питания реки (0.24–0.67) увеличивается с высотой ($R^2=0.4028$). Такая же закономерность пространственного распределения характерна для отношения среднееголетних минимальных летне-осенних и зимних расходов воды (0.80–1.71) ($R^2=0.2152$). Между средней продолжительностью маловодного периода (234–274 дней) и средней высотой водосборного бассейна связь отсутствует ($R^2=0.0004$).

На дендрограмме коэффициента паводочности четко выделяются четыре кластера. Значения коэффициента подземного питания реки образуют два больших кластера. Данные об отношении средних многолетних минимальных летне-осенних и зимних расходов воды сгруппированы в три кластера. Количество рек в этих группах практически одинаково. По средней продолжительности маловодного периода реки также образуют три кластера.

Дендрограмма, одновременно учитывающая все четыре показателя водного режима рек показана на рис. 1.

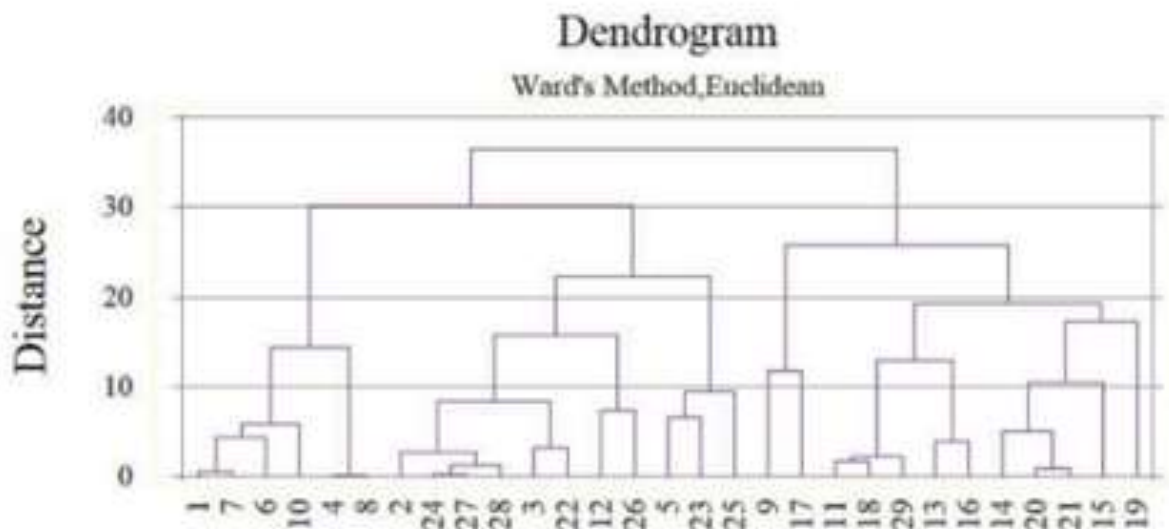


Рис. 1. Общая дендрограмма рек по четырем показателям водного режима

На этой дендрограмме четко выделяются два больших кластера. Первый кластер охватывает бассейны рек Тертер, Акера и Охчучай, а второй кластер – остальные реки. Эти кластеры полностью соответствуют гидрологическим районам, ранее выделенным по водному режиму рек на территории Карабаха (Рустамов, Кашкай, 1989). В каждом из этих двух кластеров образовались еще два под-кластера. В первом кластере один из под-кластеров включает реки бассейна Тертер, а другой – реки бассейнов Акера, Базарчай / Воротан, Охчучай и Баситчай. Во втором кластере первый под-кластер объединяет реки бассейнов Хачинчай и Каркарчай, а второй под-кластер – реки Кендаланчай и Куручай.

Таким образом, реки Карабаха по характеристикам водного режима можно разделить на два типа и каждый из этих типов – на два подтипа. Средние значения количественных показателей водного режима рек, относящихся к этим типам и подтипам приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, значения показателей, за исключением продолжительности маловодного периода, значительно различаются как по типу водного режима, так и по подтипам одного и того же типа.

Таблица 1. Средние значения количественных показателей по типам и подтипам водного режима.

Тип, подтип	Qло/Qз	Кпп	Тм, дни	Кпав
I	1.30	0.56	248	6.6
Ia	1.55	0.52	243	8.2
Ib	1.06	0.60	253	5.1
II	1.10	0.34	252	14.0
IIa	1.28	0.37	246	15.5
IIb	0.93	0.32	257	11.5

С учетом выполненной классификации рек по водному режиму на исследуемой территории были выделены два гидрологических района и в каждом из них по два подрайона. Таким образом, была уточнена существующая схема гидрологического районирования территории Карабаха по водному режиму рек. Выполненное исследование свидетельствует об эффективности кластерного метода при анализе водного режима рек и гидрологическом районировании.

Список литературы:

- Буреева Н.Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП “STATISTICA” Нижний Новгород, 2007. 112 с.
- Лукьянович М.А. Генетическая и сезонная структуры речного стока континентов // География и природные ресурсы. 2011. № 3. С. 125–133.
- Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448с.
- Рустамов С. Г., Кашкай Р. М. Водные ресурсы Азербайджанской ССР. Баку, Издательство Элм, 1989. 181 с.
- Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С., Киреева М.Б. Классификация и районирование рек по водному режиму: история, методология, перспективы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 121–134. DOI: 10.31857/S032105962102005X
- Musy A. and Higy Ch. Hydrology: Science of nature. Taylor & Francis, 2010. 346 pp.

УДК 556.535.5

ТИПИЗАЦИЯ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА РЕК РОССИИ

Каинова С.А.

Московский государственный университет, Москва, Россия, sv_ice@list.ru

Аннотация. В современных климатических условиях ледовый режим рек меняется. Предложенная классификация проявлений ледового режима подразумевает выделение потенциально опасного и потенциально полезного воздействия как непосредственно льда, так и других компонентов гидрологического режима в период с ледовыми явлениями. По данным за 2008–2023 гг. составлены карты повторяемости заторов и высших уровней с ледовыми явлениями.

Ключевые слова: ледовый режим, изменение климата, опасные ледовые явления

Для большей части России ледовый режим рек характеризуется продолжительным периодом устойчивого ледостава и несмотря на наблюдаемые климатические изменения ледовые явления ежегодно наблюдаются практически на всей территории страны. Изолиния, оконтуривающая среднюю за 2008–2023 гг. продолжительность ледовых явлений, равную 100 сут., проходит субширотно в бассейнах Волги, Дона и Днепра в районе 50–55° с.ш. и поворачивает на северо-западе страны по меридиану 30° з.д. Изменение ледового режима в современных климатических условиях – это не только сокращение продолжительности ледостава или периода с ледовыми явлениями, меняются характерные особенности ледового режима. Например, сокращается повторяемость весеннего ледохода, лед весной тает на месте, а высшие годовые уровни воды все чаще наблюдаются после очищения ото льда, из-за зимний оттепелей наблюдаются зимние вскрытия с зажорами и заторами или период с ледовыми явлениями делится на 2-3 обособленные части (Agafonova et al., 2017).

Для ледового режима, в отличие от водного, классификации в современной практике почти не используются. Хотя были разработаны классификации типов вскрытия и замерзания (Донченко, 1987, Антонов и др., 1964), классификации ледового режима, в целом и зимнего режима (т.е. с учетом режима уровней воды) и др. (Агафонова, 2019, Панов, 1960). В условиях меняющегося климата типизация ледового режима рек актуальна для того, чтобы обозначить именно современные проявления ледового режима, определяющие условия эксплуатации гидротехнических сооружений и обуславливающие опасные ледовые явления и процессы.

Влияние ледового режима на население и хозяйственную деятельность – это непосредственное воздействие и использование льда, а также особый режим расходов, уровней воды, качества воды и других компонентов гидрологического режима в период с ледовыми явлениями, т.е. говоря об опасных проявлениях ледового режима часто речь идет о неблагоприятном сочетании опасных проявлений водного, ледового режима, русловых процессов. Ледовые явления могут быть опасными для населения и хозяйства, особенно в регионах, для которых характерен неустойчивый ледостав на реках, в регионах с суровым климатом проявления ледового режима ожидаемы, т.е. обычно учитываются при проектировании гидротехнических сооружений, разрабатываются методики прогноза соответствующих гидрологических параметров. В этих регионах опасным становится «смягчение» ледового режима. Например, сокращение периода устойчивого ледостава и снижение толщины льда меняет условия эксплуатации ледовых переправ и требует дополнительных мер адаптации к наблюдаемым изменениям, повышенный приток воды к водохранилищам зимой требует дополнительной настройки режима сработки водохранилища и контроля длины полыньи в нижнем бьефе, чтобы не спровоцировать формирование заторно-зажорных явлений (Агафонова, Банщикова, 2021). Таким образом, классификация проявлений ледового режима подразумевает выделение следующих категорий:

I. Ледовое воздействие:

1) Потенциально опасное: а) ледовые нагрузки от ледяного покрова и прочих ледяных образований; б) ледовые затруднения при работе ГТС и в судоходстве, пропуск льда через строящиеся ГТС. 2) Потенциально полезное: а) ледовые переправы; б) причалы, защитные дамбы и другие ГТС из льда; в) выморозка судов и ГТС для ремонта (сухие ледяные доки).

II. Неледовое воздействие:

1) Потенциально опасное: а) затопление территории в период с ледовыми явлениями из-за высоких уровней воды, наледи речных вод; б) нарушение работы ГЭС из-за неблагоприятного режима уровней воды в нижнем бьефе; в) отсутствие стока из-за промерзания; г) опасные проявления русловых процессов, в том числе при прорыве заторов льда.

2) Потенциально полезное: а) регулирование режима затопления пойм, регулирование уровней воды для водозаборов; б) регулирование гидрохимического режима и качества воды за счет повышения льдистости водных объектов.

Важная характеристика проявления ледового режима - повторяемость лет, в которые высшие годовые уровни воды сопровождаются ледовыми явлениями. Наводнения в период с ледовыми явлениями опасны тем, что происходят в холодное время года и могут сопровождаться выходом льда на берег. Ущерб от таких наводнения, как правило, превышает ущерб от наводнений в период свободной ото льда реки (Бузин, 2004). На рис. 1 представлена карта повторяемости высших годовых уровней воды, сопровождающихся ледовыми явлениями, составленная по данным гидрологических постов за период с 2008 по 2023 гг. Стоит отметить, что ледовые явления, сопровождающие высшие годовые уровни воды – это не только заторы и/или зажоры. Высшие годовые уровни могут наблюдаться на фоне подвижек, ледохода, неполного ледостава, в условиях, когда вода течет поверх льда и т.д.

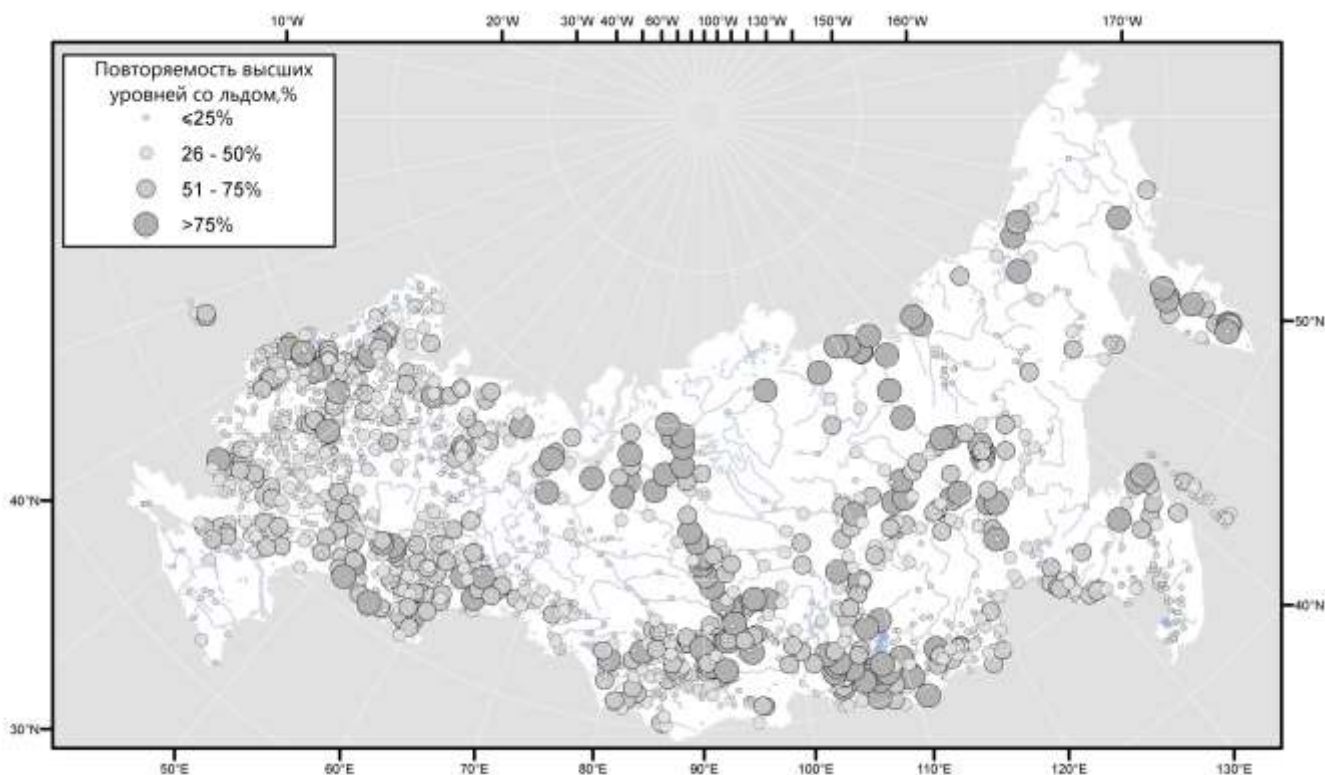


Рис. 1. Ледовые условия формирования высших годовых уровней воды (2008–2023 гг.)

По данным наблюдений за 2008-2023 гг. высокая повторяемость заторов (>75%) характерна для рр. Луга, Иртыш, Казым, Северная Сосьва, Лена, Оленек, Колыма, Усури, Амур и др. (рис. 2). Хотя наблюдения на гидрологических постах не всегда позволяют

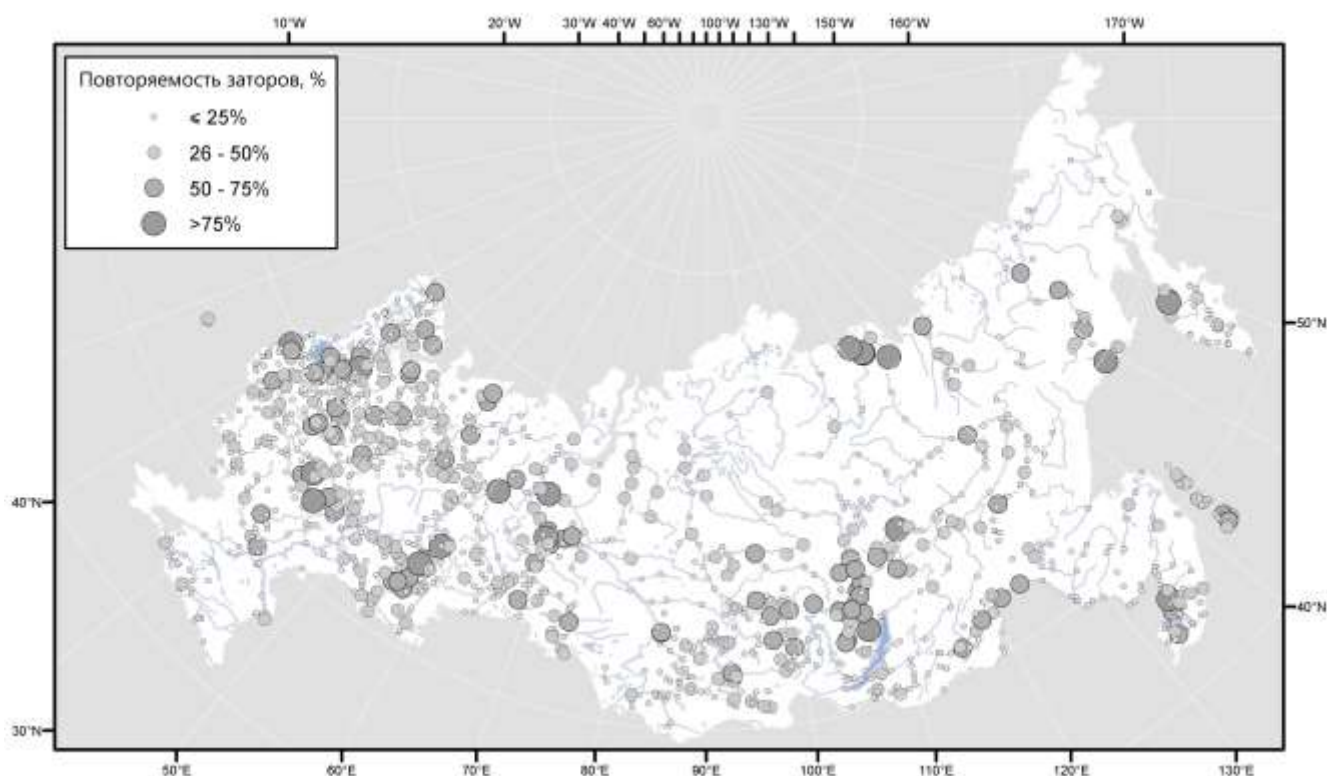


Рис. 2. Повторяемость затворов (2008–2023 гг.)

отследить формирование затворов, такие обобщения полезны для выделения наиболее заторных регионов в современных условиях.

Самыми общими характеристиками ледового режима являются средние даты появления льда, установления ледостава, вскрытия и очищения ото льда, а также продолжительность периода с ледовыми явлениями и продолжительность ледостава. Эти характеристики можно картировать, но в условиях изменения климата карты характеристик ледового режима требуют регулярного обновления. Для неизученных незарегулированных рек с площадью водосбора $< 400\,000\text{ км}^2$ в качестве альтернативы можно вместо карт использовать зависимости средних характеристик ледового режима от климатических параметров для заданного периода (Агафонова, Банщикова, 2022).

Исследование выполнено в рамках Государственного задания кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Список литературы:

- Агафонова С. А., Банщикова Л. С. Расчетная толщина льда на реках севера азиатской части России // Гидротехническое строительство. 2022. № 10. С. 20–25.
- Агафонова С. А., Банщикова Л. С. Современные условия образования заторно-зajorных скоплений в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 89–99.
- Агафонова С.А. Исследования ледового режима рек Арктической зоны России в XX и XXI вв. // Арктика и Антарктика. 2019. № 1. С. 81–94.
- Антонов В. С., Иванов В. В., Налимов Ю. В. Типовые особенности ледового режима северных рек арктической зоны // Проблемы Арктики и Антарктики. 1964. Вып. 15. С. 11–17.
- Бузин В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 203 с.

Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 247 с.

Панов Б.П. Зимний режим рек СССР. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1960. 240 с.

Agafonova S.A., Frolova N.L., Krylenko I.N., Sazonov A.A., Golovlyov P.P. Dangerous ice phenomena on the lowland rivers of European Russia // Natural Hazards. 2017. Vol. 88, no. S1. P. 171–188. DOI: 10.1007/s11069-016-2580-x

УДК 556.5.06

ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОСНОВНЫХ РЕК МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ В XXI ВЕКЕ

Калугин А.С.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, *kalugin-andrei@mail.ru*

Аннотация. Исследование посвящено оценке изменения водного режима крупных рек Московской области (Оки, Москвы, Клязьмы) при различных реализациях будущего климата на основе физико-математической модели формирования стока и данных моделей Земной системы. Представлены результаты верификации гидрологической модели за исторический период, а также оценки точности воспроизведения метеорологических и гидрологических характеристик по данным глобальных моделей климата и данным наблюдений. На основе ансамбля климатических моделей рассчитаны изменения температуры воздуха, осадков и речного стока к середине XXI века по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 относительно исторического периода.

Ключевые слова: реки Московской области, гидрологическая модель, изменения климата.

Применение моделей гидрологического цикла позволяет получить физически обоснованные характеристики изменения водного режима рек при использовании данных современных моделей Земной системы (ESMs). Применяемый подход, объединяющий гидрологическую модель с моделями климата, позволяет в наибольшей степени учесть разнообразие физических механизмов реакции речного стока на климатические воздействия.

Для оценки гидрологических последствий изменения климата среди рек Московской области были выбраны наиболее крупные в следующих речных створах: р. Ока – г. Кашира, р. Москва – г. Коломна, р. Москва – с. Петрово-Дальнее, р. Клязьма – г. Орехово-Зуево, р. Осетр – д. Маркино. Для моделирования речного стока была использована физико-математическая модель его формирования с распределенными параметрами на основе комплекса ECOMAG для всего бассейна р. Оки (Kalugin, 2019). Исходной информацией для модели с суточным расчетным шагом послужили глобальные базы данных рельефа, почв, растительности, а также многолетние ряды станционных ежедневных наблюдений за температурой и дефицитом влажности воздуха, осадками на 90 метеостанциях и расходами воды, определяемыми Росгидрометом в двух из указанных речных створов. Была подготовлена база необходимой для гидрологической модели метеорологической информации с использованием данных моделей Земной системы CMIP6 из проекта ISIMIP (Krysanova, Hattermann, 2017) на регулярной сетке 0.5° (Lange, 2019). Используются 5 моделей Земной системы: GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL. Для выявления климатообусловленных изменений речного стока расчеты по данным климатических моделей выполнены в естественных условиях его формирования.

Критерии эффективности моделирования стока по данным метеостанций за период 2008-2023 гг. оказались следующие: в створе р. Ока – г. Кашира KGE = 0.81 и PBIAS = 1%, в створе р. Осетр – д. Маркино KGE = 0.75 и PBIAS = 6%. Оценка точности воспроизведения указанными климатическими моделями метеорологических величин в сравнении с данными наблюдений за базовый период 1995–2014 гг. показала, что погрешность расчета среднегодовой температуры воздуха, осредненной по бассейну р. Оки, составила в среднем по ансамблю ESMs 0.5°C при диапазоне для отдельных моделей 0.2–0.7°C, для осадков – 7% по ансамблю и 4–9% по отдельным ESMs. Сезонный ход воспроизведен по данным ESMs и по температуре воздуха, и по осадкам.

Результаты моделирования формирования в бассейне р. Оки с использованием данных ESMs за базовый период показали, что относительная погрешность расчета нормы стока составила в среднем по ансамблю ESMs в створе Кашира 23%, стока Москвы в створе Коломна

– 5%, в створе Петрово-Дальнее – 10%, Клязьмы в створе Орехово-Зуево – 7%, р. Осетр в створе Маркино – 15%. Согласно данным ESMs сток с декабря по февраль завышен в различных створах на величину от 10% до 18% с связи с завышенными осадками осенью. Весенний сток с марта по май завышен относительно расчета по данным метеостанций на Оке на 20%, а в остальных створах погрешность оказалась в пределах 8%, что объясняется завышением осадков в декабре-январе в среднем на 10%. Согласно ESMs отмечена общая тенденция перехода температуры воздуха к положительным значениям на 7–10 дней раньше, чем по данным метеостанций, что приводит к более раннему подъему весеннего половодья в марте. Абсолютные ошибки воспроизведения летне-осеннего меженного стока оказались меньше, чем за период весеннего половодья.

Для сценарных расчетов изменения водного режима рек Московской области за период 2041–2060 гг. относительно базового периода 1995–2014 гг. использовались метеоданные ESMs с учетом двух SSP-сценариев: SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Результаты расчетов по ансамблю ESMs показали, что возможный рост среднегодовой температуры воздуха в 2041–2060 гг. составит 1.6°C при сценарии SSP2-4.5 и 2.3°C при SSP5-8.5 при увеличении годовой суммы осадков на 3% согласно обоим сценариям. Потепление зимой и летом интенсивнее, чем весной и осенью. Наибольшее увеличение осадков в бассейне Оки ожидается в зимний период на 18–22%. Для весенних осадков отмечено увеличение на 5–7%. Летом, наоборот, ожидается снижение количества осадков на 6–9%. По осенним осадкам возможен рост на 5% относительно 1995–2014 гг.

В 2041–2060 гг. уменьшение годового стока Оки в створе Кашира составит 7% при SSP2-4.5 и 12% при SSP5-8.5, стока Москвы в створе Коломна – 8% и 17%, в створе Петрово-Дальнее – 9% и 21%, Клязьмы в створе Орехово-Зуево – 7% и 12%, р. Осетр в створе Маркино – 10% и 15%. Особенно выражено увеличение стока зимой на Оке и Клязьме (на 35–40%) по сравнению с рр. Москва и Осетр (на 15–20%), а с апреля по ноябрь ожидается сокращение стока рек относительно периода 1995–2014 гг. с наибольшими относительными значениями в августе-сентябре (на 40–50%) (рис. 1). Дополнительное сокращение стока по более негативному сценарию потепления составляет порядка 5% для Оки, Клязьмы и Осетра, а для р. Москвы – около 10%.

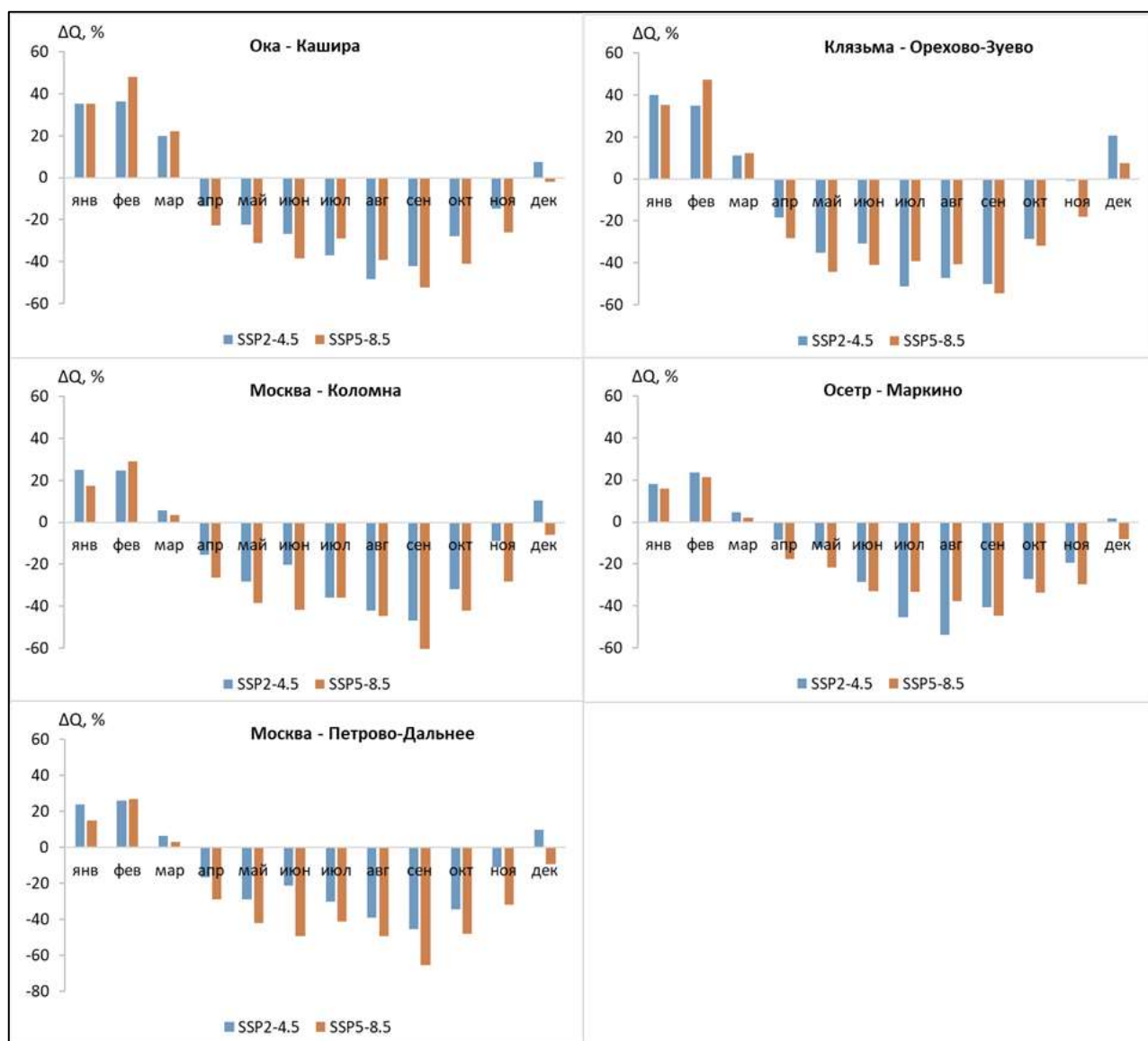


Рис. 1. Изменения среднемесячного стока рек Московской области, смоделированного за 2041–2060 гг. при реализации сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 относительно 1995–2014 гг.

Список литературы:

- Kalugin A.S. The impact of climate change on surface, subsurface and groundwater flow: a case study of the Oka River (European Russia) // *Water Resources*. 2019. Vol. 46. No. S2. P. S31–S39.
- Krysanova V., Hattermann F. Intercomparison of climate change impacts in 12 large river basins: overview of methods and summary of results // *Climatic Change*. 2017. Vol. 141. P. 363–379.
- Lange S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0) // *Geosci. Model Dev*. 2019. Vol. 12. P. 3055–3070.

УДК 551.4.042; 551.435.47

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ПРОРЫВОВ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР КАВКАЗА НА ОСНОВЕ КАТАЛОГА 2025 ГОДА

Кидяева В.М.¹, Аверина А.А.², Юдина В.А.¹, Павлюкевич Е.Д.², Губанов А.С.¹

¹Московский государственный университет, Географический факультет, Москва, Россия, vera.kidyaeva@yandex.ru

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия.

Аннотация. Каталог ледниковых озер Большого Кавказа, созданный в 2025 г., содержит подробные сведения о 411 ледниковых озерах на высотах выше 2000 м н.у.м. и площадью более 500 м². Анализ каталога позволяет выявить закономерности развития и распространения ледниковых озер, проследить влияние деградации оледенения на гидросферу высокогорья, выявить озера, возникшие в последние десятилетия и оценить наиболее потенциально опасные озера.

Ключевые слова: Большой Кавказ, ледниковое озеро, деградация оледенения, прорывоопасность

Современная дегляциация приводит к изменению в гидросфере горных территорий (Haeblerli et al., 2016). Наблюдается две разнонаправленные тенденции: с одной стороны, появляются новые и увеличиваются в размерах существующие ледниковые озера, с другой стороны, озера могут исчезать – прорываться, спускаться или заноситься наносами. Исследования подтверждают, что современное оледенение Большого Кавказа активно деградирует – баланс массы по опорным ледникам Джанкуат и Гарабаши отрицателен последние 20 лет, а отступление ледниковых фронтов может достигать десятков м/год. Суммарная площадь оледенения Большого Кавказа с начала XXI века уменьшилась на 23.2% к 2020 г. и составила 1060.9±33.6 км² (Tielidze et al., 2022). При этом, точная суммарная площадь ледниковых озер в горах Большого Кавказа и динамика ее изменений неизвестна в связи с отсутствием единого подхода к подсчету количества озер, разными критериями отбора исследуемых озер и сложностью выявления их генетических типов. Кроме того, при деградации оледенения увеличивается вероятность прорывов ледниковых озер с образованием разрушительных прорывных паводков и селей (Perov V. et al., 2017; Черноморец и др., 2018).

Создание каталога ледниковых озер Большого Кавказа позволяет решить данные задачи. Каталог был создан по результатам дешифрирования космических снимков Sentinel-2 за август-сентябрь 2025 г. с использованием материалов каталога 2018 г. (Хромова и др., 2021; Каталог..., 2022), туристических баз данных (<https://caucatalog.ru/lakes/lakes.html/>; <https://mountaindreams.ru/> (дата обращения 01.02.2026)), данных предыдущих исследований (Ефремов, 1988; Шахмина и др., 2007), космических снимков Google Earth и топографических карт.

В каталог 2025 г. вошли только озера, расположенные выше 2000 м н.у.м. и площадью более 500 м². Озера были распределены на четыре категории – супрагляциальные, прогляциальные, перигляциальные и экстрагляциальные. Для каждого озера определен ледник, расположенный выше по долине, название реки и речной системы, снята отметка уреза, измерена площадь. Дополнительно определялось наличие поверхностного стока, состояние водоудерживающей перемычки, состояние береговых склонов, расстояние до ближайшего ледника, возраст, стадия развития, произведена оценка потенциальной опасности. Для экстрагляциальных озер определялись только площади.

В каталоге приведены следующие характеристики водоудерживающих перемычек: лед, морена со льдом, морена, морена на скальном основании, скальный ригель. Возраст озер определен по трем категориям (более 50 лет, 50-25 лет, менее 25 лет, среди которых отдельно выделены озера, появившиеся после 2018 г.).

Озера классифицированы по стадиям развития: 1 стадия – возраст озер до 25 лет, резкое увеличение площади за этот период, изменение конфигурации берегов, расположены близко к леднику; 2 стадия – более стабильные озера, чаще перигляциальные, разного возраста, на

которых не наблюдалось существенных изменений площади и береговой линии; 3 стадия – озера, близкие к завершению своего существования, возможно, заносимые наносами, прорвавшиеся или спустившиеся.

Характеристики ледниковых озер, собранные в каталоге, позволили провести оценку потенциальной опасности прорывов. Оценка опасности проводилась по 3 степеням:

1) опасные (большая площадь, наличие льда в водоудерживающей перемычке, близость к леднику, чаще прогляциальные или супрагляциальные, отсутствие поверхностного стока, наличие каскада озер выше по долине, наличие опасных крутых склонов над озером, первая стадия развития);

2) среднеопасные (проявляются не все факторы, характерные для опасных озер, средняя или малая площадь водной поверхности);

3) неопасные (малая площадь, наличие стока, чаще перигляциальные или экстрагляциальные, удаленные от ледников, на скальных ригелях или моренные, вторая стадия развития).

В каталог ледниковых озер Большого Кавказа вошли 411 озер, из них (370 – перигляциальных, 32 – прогляциальных, 9 – супрагляциальных), а также 973 экстрагляциальных озера. Больше всего ледниковых озер расположено на Центральном Кавказе – 182 озера, на Западном Кавказе – 134 озера, а на Восточном всего 95.

На высотах 2000-2500 м н.у.м. расположено 28 озер, 2500-3000 м н.у.м. – 180 озер, 3000-3500 м н.у.м. – 166 озер, 3500-4000 м н.у.м. – 35 озер, выше 4000 м – 2 озера. Самое высокогорное ледниковое озеро расположено в верховьях р. Мидаграбиндон, у ледника Зангелан (Зейгалан), под вершиной Зейгалан, на высоте 4280 м.

На расстоянии до 100 м от языков ледников расположено 105 озер, в пределах 500 м расположено 270 озер, остальные лежат ниже в долинах. Потенциально опасных озер всего 80, среднеопасных – 216, неопасных – 115. Моренная со льдом или ледяная перемычка предположительно есть у 108 озер, в моренных отложениях находятся 239 озер, и перемычки 64 озер имеют скальные основание. Возраст больше 50 лет у 141 озера, возраст 50-25 лет у 154 озер, возраст 25-7 лет у 100 озер, и всего 16 озер образовались после 2018 г.

Общая площадь ледниковых озер (без экстрагляциальных) составила 5.05 км². Объем озер рассчитывался по эмпирической формуле (Кидяева, 2014) и составил около 2.23 км³.

Крупнейшие перигляциальные озера: оз. Клухор (178.5 тыс. м²), оз. Сылтранкель (152.5 тыс. м²), оз. Уллу-кель в долине р. Кичкинекол (143.5 тыс. м²), оз. Далар (106.5 тыс. м²). Крупнейшие прогляциальные озера: оз. Аманауз (170.6 тыс. м²), оз. Эдерасо (76.5 тыс. м²), оз. Чалаучат верхнее (65.8 тыс. м²), оз. Азимба (58.7 тыс. м²), оз. Гондарай правое (49.7 тыс. м²), оз. Гондарай левое (37.3 тыс. м²), оз. Башкара (36.3 тыс. м²). Крупнейшее экстрагляциальное озеро: оз. Большое Имеретинское (144.9 тыс. м²).

Крупнейшие новые озера, образовавшиеся после 2018 г.: два озера под пиком Калицкого на северном склоне г. Эльбрус (суммарная площадь 58.3 тыс. м²), озеро под хребтом Ктиберда, у г. Большая Марта (12.8 тыс. м²), озеро у ледника Морде-Ауж, в верховьях р. Морде (9.4 тыс. м²).

Среди исследованных озер по сравнению с каталогом 2018 г. всего 59 озер уменьшились по площади, 97 озер выросли, остальные не изменились или по ним нет данных об изменении площади.

Крупнейшие озера, на которых наблюдался наибольший прирост площади за последние 7 лет:

1) каскад озер у ледника Цанери (р. Цанер, приток р. Мулхура) – общая площадь увеличилась в 5 раз за счет слияния каскада озер и активных термокарстовых процессов на языке ледника, в 2025 г. общая площадь водоемов оценивается в 94.7 тыс. м²;

2) общая площадь озер у ледника Уллуаузна (или Уллуауз, р. Думала, приток р. Черек) увеличилась в 4.7 раз из-за объединения каскада озер с образованием крупного мелководного водоема (106.4 тыс. м²);

3) оз. Эдерасо у ледника Эдерасо (или Тинавчегелать, р. Брахинтарахор, приток р. Жекода) увеличилось в 4.3 раза за счет деградации части ледника, которая отделилась от основного тела ледника, спускающегося со склона хребта в долину р. Брахинтарахор. Озеро расположено в бывшем ледниковом каре и, вероятно, имеет большую глубину и площадь 76.5 тыс. м²;

4) значительно увеличились два озера в верховьях р. Гондарай – в 3.2 раза выросло озеро на правом борту долины (49.7 тыс. м²) и в 2.6 раз – на левом борту долины (37.3 тыс.м²);

5) озеро у ледника Сакени (р. Сакени, приток р. Клыч) выросло в 7 раз за 7 лет (до 19.9 тыс. м²);

6) оз. Аманауз (р. Аманауз, приток р. Псыш) увеличилось в 1.4 раза, но, поскольку это крупнейшее ледниковое прогляциальное озеро Большого Кавказа, то суммарный прирост площади велик. Если в 2018 г. площадь составляла 121.3 тыс. м², то в 2025 г. – уже 170 тыс. м² (рис.1). Объем воды в озере оценивается в 2.4 млн м³ (рис.1).

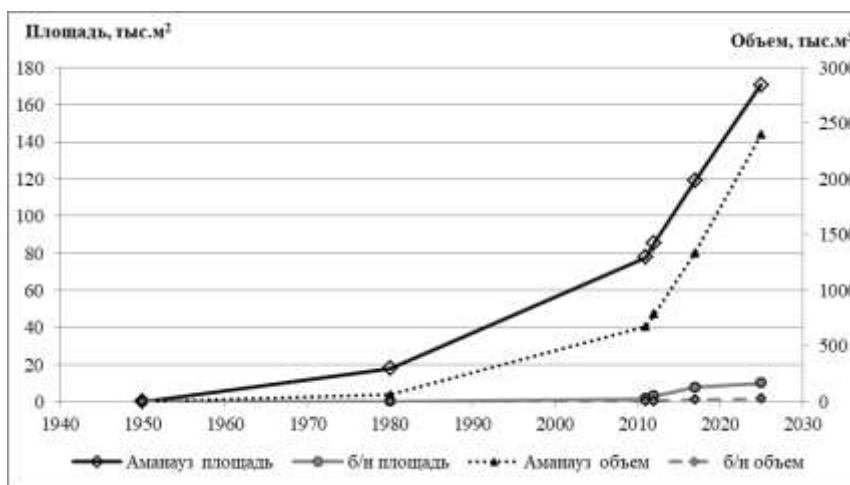


Рис. 1. Изменение площади и объема оз. Аманауз и озера б/н.

Оз. Аманауз является одним из наиболее опасных ледниковых озер Большого Кавказа по данным 2025 г. Подпруда озера смешанного типа: вдоль стока из озера по правому борту расположен скальный ригель, по левому борту – моренные отложения. У правого борта долины, в 2011 г. в моренных отложениях появилось второе озеро, которое тоже продолжает расти (рис.1).

В случае прорыва опасности будут подвержены отдельные строения и населенные пункты, расположенные ниже по течению в пойме р. Псыш: в 13–15 км расположены глемпинги, кемпинги и гостевые дома, в 16.4 км расположена Софийская поляна, приблизительно в 20 км – с. Архыз.

Прорыв оз. Аманауз возможен при условии разрушения моренной перемычки, продолжения интенсивного таяния ледника, падения в озеро ледяных айсбергов, а также при выпадении интенсивных осадков редкой обеспеченности и высокой интенсивности. На озере рекомендуется проведение полевых рекогносцировочных обследований и мониторинг уровня режима.

Среди озер, которые уменьшились в размерах с 2018 г., можно отметить: оз. Лапа (ледник Башкара, р. Адылсу, приток р. Баксан) – спустилось в результате прорыва оз. Башкара; оз. Кривое (ледник Бирджалычиран, р. Бирджалысу, приток р. Малка) было занесено селом, сошедшим с ледника, частично спустилось; оз. Снежниковое в той же долине – уменьшилось из-за колебаний уровня и, возможно, из-за изменения режима подземного питания.

Заключение

Общее число включенных в каталог ледниковых озер составляет 411, среди них наибольшее количество сосредоточено на Центральном Кавказе (182 озера), что обусловлено высокой долей оледенения и активной деградацией ледников на этой территории.

Основная масса озер (346) находится в интервале высот 2500–3500 м н.у.м. Более половины озер (270) расположены в пределах 500 м от языков ледников, что подтверждает тесную связь их формирования с процессами деградации оледенения.

За последние 25 лет образовалось 116 новых озер, из них 16 – после 2018 г. Площадь 97 озер увеличилась, 59 озер – сократилась. Общая площадь озер составила 5.05 км². Объем озер оценивается в 2.23 км³.

Из 411 озер 80 отнесены к категории опасных, 216 – к среднеопасным. Наиболее опасным является оз. Аманауз – крупнейшее прогляциальное ледниковое озеро Кавказа, характеризующееся активным приростом площади. Прорыв озера возможен при комплексе неблагоприятных факторов и способен вызвать катастрофический паводок, опасный для рекреационной инфраструктуры с. Архыз в долине р. Псыш.

Созданный каталог обеспечивает актуальную основу для мониторинга потенциально опасных объектов, планирования противопаводковых мероприятий и водохозяйственной деятельности в высокогорье. Для наиболее динамичных озер необходимы инструментальные наблюдения и моделирование прорывных сценариев.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-10049 <https://rscf.ru/project/25-77-10049/>

Список литературы:

Ефремов Ю. В. Голубое ожерелье Кавказа. – Гидрометеиздат, 1988.

Каталог Ледников Кавказа <https://www.glacru.ru/> Copyright © 2022 Каталог ледников России ИГРАН.

Кидяева В.М. Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озер. Диссертация на соискание ученой степени к.г.н. МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва, 2014.

Хромова Т. Е., Носенко Г. А., Глазовский А. Ф., Муравьев А. Я., Никитин С. А., Лаврентьев И. И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) //Лёд и снег. – 2021. – Т. 61. – №. 3. – С. 341-358.

Черноморец С. С. и др. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года //Криосфера земли. – 2018. – Т. 22. – №. 2. – С. 70-80.

Шахмина М.С., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. База данных современных приледниковых озер центральной части Северного Кавказа // Инновационные технологии для устойчивого развития горных территорий. Материалы VI Международной конференции 28-30 мая 2007 г. – Терек Владикавказ, 2007. – С. 303–304.

Haerberli W. et al. New lakes in deglaciating high-mountain regions—opportunities and risks //Climatic change. – 2016. – Т. 139. – №. 2. – С. 201-214.

Perov V. et al. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events //Natural Hazards. – 2017. – Т. 88. – №. Suppl 1. – С. 199-235.

Tielidze, L. G., Nosenko, G. A., Khromova, T. E., & Paul, F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020 //The Cryosphere. – 2022. – Т. 16. – №. 2. – С. 489-504.

УДК 556.5

СРАВНЕНИЕ АМПЛИТУДНЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РЕКИ КЕРЖЕНЕЦ В XX И XXI ВЕКАХ

Кораблева О.В.

ФГБУ «Нижегородское Поволжье», Нижний Новгород, Россия, *o-korableva@mail.ru*

Аннотация. В статье сравниваются и сопоставляются амплитудные колебания между максимальными весенними половодными и минимальными меженными уровнями поверхностных вод реки Керженец, являющейся левым притоком Волги; дан анализ за периоды с 1934 по 1999 гг. по сведениям гидропоста с. Хахалы и с 2000 по 2025 гг. по мониторинговым наблюдениям в Керженском заповеднике.

Ключевые слова: Керженец, Волжский бассейн, амплитудные колебания уровней, гидропост, Керженский заповедник.

Гидрологический режим, в том числе колебания уровней рек, является важным свидетельством физико-географических условий, климатических характеристик, антропогенных воздействий. Ученые-гидрологи (Алексеевский и др., 2011) отмечают, что изучение особенностей режима рек позволяют выявить многие соотношения между элементами водного баланса, особенности питания рек, формирования их естественных ресурсов.

Наибольшей загруженностью обладает Волжский бассейн, река Волга представлена многочисленными водохранилищами, поэтому анализировать и прогнозировать изменения уровней и других показателей очень проблематично. И. А. Жуков (2023) отмечает, что на малых реках бассейна Волги характерен тренд к уменьшению максимальных расходов и отсутствию весеннего половодья, в тоже время отмечено увеличение минимального стока. В данном случае об изменениях Волжского бассейна можно судить по гидрологическому режиму притоков Волги, на которых не происходит прямого антропогенного воздействия.

Цель данной статьи: сравнить и сопоставить амплитудные колебания уровней поверхностных вод на одной из рек Волжского бассейна, реки Керженец, в XX и XXI веках. В статье сравниваются значения колебаний между максимальными (весенними) и минимальными (зимними или летними) уровнями поверхностных вод в Керженце. Данные показатели являются более информативными, так как учитывается водность реки не только в половодье, но и межень.

Река Керженец является левым притоком Волги, протекает по территории низменного Нижегородского Заволжья. Протяженность Керженца от истока до устья составляет 290 км. Речная долина представлена руслом, поймой и двумя террасами. В целом пойма достаточно обширная, где река петляет и образует излучины, пойма составляет 1 км. Выделяются участки с прямолинейным руслом, где трудно размываемые коренные пермские либо моренные отложения выходят на поверхность. На таких участках пойма очень узкая, 10-20 м, либо она отсутствует (Кораблева, 2010). По гидрологическому режиму Керженец относится к равнинному восточно-европейскому типу, для которого характерны высокое половодье весной, меженный уровень летом и зимой, в летний и осенний периоды возможны кратковременные подъемы воды, вызванные дождевыми паводками. Весеннее половодье является главной фазой и отличительной чертой водного режима рек бассейна Волги.

Для сравнительного анализа были использованы данные измерений уровней р. Керженец гидропоста у с. Хахалы (Верхне-Волжский УГМС) (Государственный ..., 1989) и гидропоста у пос. Рустай (Государственный заповедник «Керженский», в настоящее время ФГБУ «Нижегородское Поволжье») (Керженский ..., 2025).

Отметка нуля государственного гидропоста с. Хахалы равна 84.28 м в Балтийской системе. Ширина русла Керженца составляет 45 м. Берега достаточно высокие и крутые, сложены пермскими мергелями, на которых выше залегают глинистые и суглинистые с

гравием и щебнем моренные отложения. Высота левого берега достигает 8 м, правого – 4 м. Расстояние от истока 164 км, от устья – 126 км.

Отметка нуля водомерного ведомственного поста пос. Рустай составляет 80.82 м в Балтийской системе. Створ гидропоста размещен под мостом, в данном локальном месте берега закреплены бетонными плитами, далее они песчаные и рыхлые пологие, ширина русла 60 м, пойма широкая и двухсторонняя с озерами – старицами. Расстояние 208 км от истока, 81 км от устья. Разница между гидропостами по руслу Керженца составляет 45 км.

Амплитуда колебаний уровней поверхностных вод определялась путем вычитания из максимального значения (пик весеннего половодья) минимального уровня поверхностных вод в Керженце в наблюдаемом году. Данный показатель является более информативным, так как учитывает водность реки не только в половодье, но и межень. Значения уровней р. Керженец с 1935 г. по 1980 г. опубликованы в Государственном водном кадастре (1989). С 1980 по 1986 гг. данные уровней р. Керженец отсутствуют. С 1987 г. по 2001 г. сведения были предоставлены Гидрометеорологическим центром (Верхне-Волжское УГМС) по запросу администрации Керженского заповедника в рукописном виде. Далее сведения не предоставлялись. На гидропосте Хахалы доступны интернет сведения об уровнях за 3 года с 2021 по 2023 гг. (Уровень ..., 2026). В дальнейшем анализ уровней проводился по результатам мониторинга Керженского заповедника, где был в 1997 г. организован гидропост в пос. Рустай силами сотрудников заповедника (Баянов, Кораблева, 2014; Кораблева, Чернов, Исаев, 2025).

На основе полученных результатов гидропоста с. Хахалы в XX в. за 60 лет (рис. 1) определились годы (11 значений) с высокими показателями амплитуд (более 600 см): 1936, 1942, 1947, 1948, 1955, 1957, 1959, 1963, 1966, 1970, 1979. С низкими амплитудными значениями (менее 400 см) оказались следующие годы (11 значений): 1937, 1950, 1964, 1965, 1967, 1971, 1976, 1977, 1987, 1996, 1997.

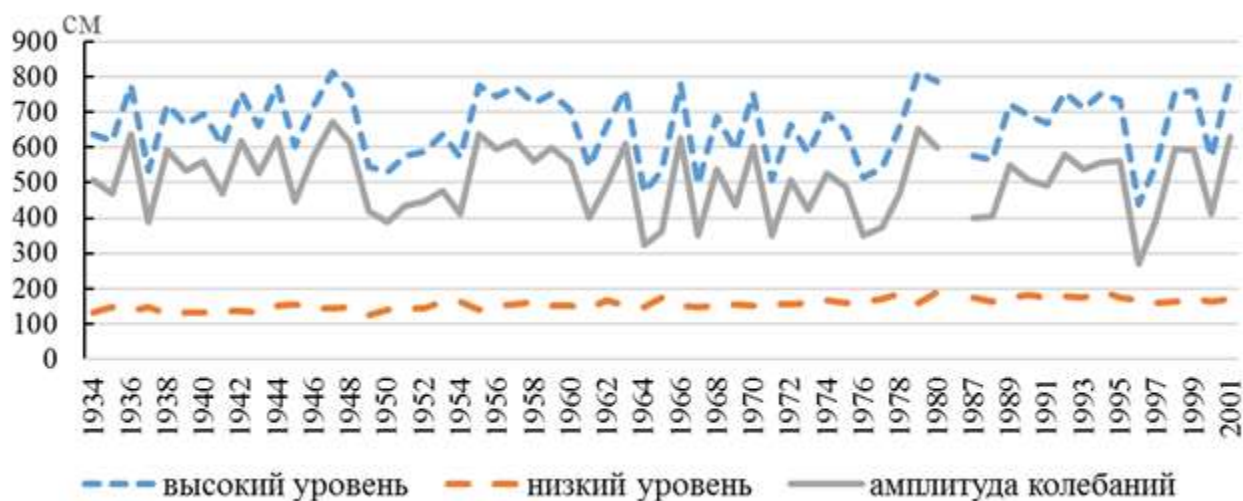


Рис. 1. Максимальные, минимальные уровни и амплитуды колебаний уровней поверхностных вод р. Керженец в XX в., гидропост с. Хахалы

Величины амплитудных колебаний уровней вод Керженца гидропоста пос. Рустай (рис. 2) в XXI веке показывают, что за 26 лет наблюдений 5 раз были выявлены высокие значения (более 400 см): 2001, 2005, 2012, 2013, 2016 годы. Определены годы (7 значений) с низкими показателями (менее 200 см): 2004, 2007, 2010, 2014, 2015, 2019, 2025.



Рис. 2. Максимальные, минимальные уровни и амплитуды колебаний уровней поверхностных вод р. Керженец в XXI в., пос. Рустай (Керженский заповедник)

Для корреляции и понимания синхронности колебаний уровней вод Керженца были сопоставлены совпадающие годы мониторинга на обоих постах. Эти годы отражены на рис. 3. Был определен коэффициент ранговой корреляции, который составил 0.94. Показатели колебаний можно сравнивать и сопоставлять как единый ряд, сохраняющий похожую тенденцию. Отличия составляют только в одинаковой разнице между уровнями. Высота на графике колебаний уровней поверхностных вод (рис. 3) в пос. Рустай меньше на 230 см, это связано с более расширенными неглубоким руслом, двусторонней поймой и песчаными берегами, влияющих на распределение водных объемов и уменьшением общей урениной водной поверхности.

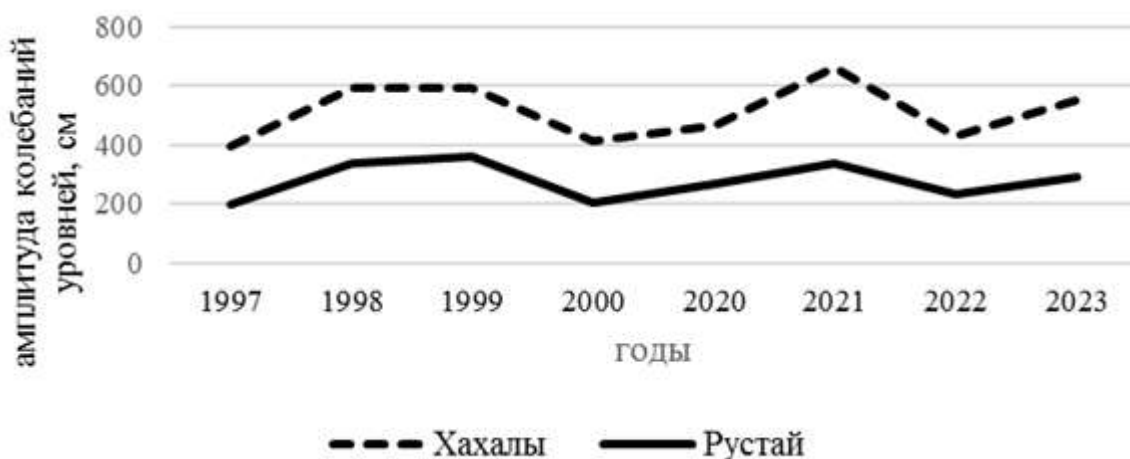


Рис. 3. Сопоставление значений амплитуды колебаний уровней поверхностных вод р. Керженец на гидропостах Хахалы и Рустай

Для построения общего графика полученная разница (230 см) была добавлена к показателям амплитудных колебаний пос. Рустай и построена линия тренда (рис. 4), ее горизонтальное расположение показывает сохранение среднего значения колебаний на протяжении 90 лет.

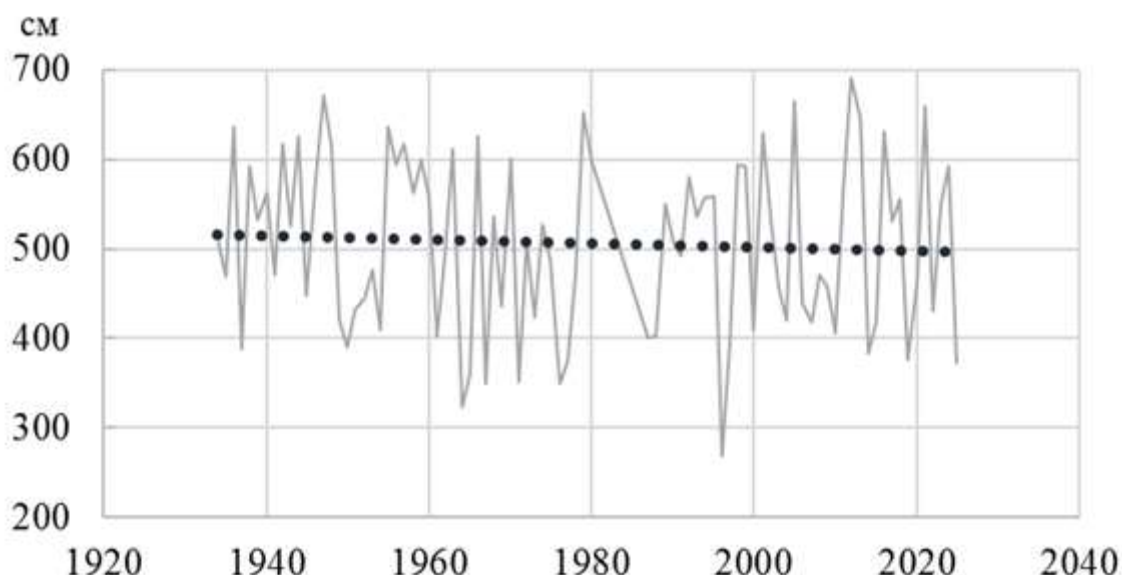


Рис. 4. Линия тренда и амплитуда колебаний уровней вод р. Керженец с 1934 г. по 2025 г.

В результате анализа уровня режима и сравнения амплитудных колебаний р. Керженец были выявлено, что мониторинговый гидропост Керженского заповедника отражает действительную картину изменений уровней Керженца и может служить для последующего анализа и изучения гидрологических особенностей реки.

Амплитуда колебаний в первую очередь зависит от высоты максимальных уровней во время весенних половодий, так как низкий уровень межени очень мало отличается от многолетних средних значений.

Среди значений амплитудных колебаний уровней поверхностных вод Керженца, полученные в XX веке на протяжении 60 лет (с 1934 по 1980 гг.; с 1987 по 1999 гг.), 18% составили годы с высокой амплитудой, и столько же с низкой амплитудой, 64% – средние значения.

В XXI веке за 26 лет мониторинговых наблюдений (с 2000 по 2025 гг.) 20% составили годы с высокими показателями амплитудных колебаний, 28% с низкими, 52% – средние значения.

Частота повторяемости значений высоких колебаний по сравнению с прошлым веком сохраняется, но при этом четкой периодичности их проявлений не прослеживается. В XXI веке увеличилась частота повторяемости низких уровней амплитудных колебаний.

В целом тенденция по изменению амплитудных колебаний уровней поверхностных вод р. Керженец не имеет отклонений от среднего значения на протяжении почти столетнего периода. Это свидетельствует о относительно стабильной ситуации и отсутствии значимых факторов, изменяющих гидрологический режим реки Волжского бассейна.

Список литературы:

Алексеевский Н.И., Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Повалишникова Е.С., Антонова М.М., Оценка влияния изменений климата на водный режим и ресурсы поверхностных и подземных вод бассейна Волги // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды междунар. науч.-практ. конф. Пермь: ПГУ, 2011. Т. 3. С. 3–9

Баянов Н.Г., Кораблева О.В. Характеристика гидрологического года в Керженском заповеднике: методические подходы // Тр. Государственного природного биосферного заповедника «Керженский». Нижний Новгород: Государственный природный биосферный заповедник «Керженский», 2014. Т. 6. С. 55–64.

Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1: РСФСР, вып. 3: Бассейн Волги. 214 с.

Жуков И.А. Изменения водного режима малых рек бассейнов Волги и Урала // Инженерные изыскания в строительстве: материалы пятой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов. М.: Геомаркетинг, 2023. С. 73–78.

Кораблева О.В. Морфология долины и деформации русла р. Керженец (Нижегородское Заволжье) // Геоморфология. 2010. № 2. С. 69–78.

Кораблева О.В., Чернов А.В., Исаев А.В. Эрозионно-аккумулятивные процессы в долинах левобережных притоков средней Волги // Географический вестник. 2025. № 3(74). С. 6–19.

Керженский заповедник. Летописи природы. Режим доступа: <https://old.kerzhenskiy.ru/biblioteka/izdatelstvo-kerzhenskiy-zapovednik/avtopis-prirody/> (дата обращения 22.12.2025).

Уровень воды в реке Керженец в селе Хахалы. Режим доступа: <https://urovenvody.ru/gov/hahaly.php> (дата обращения 10.01.2026).

УДК 556.16

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГОДОВОГО ПРИТОКА В БАЛТИЙСКО-БЕЛОМОРСКОМ РЕГИОНЕ

Курочкина Л.С.

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия,
kurochkina_liubov@hydrology.ru

Аннотация. На основе данных 830 гидрологических постов (1950–2023 гг.) и методики, интегрирующей наблюдения и скорректированный ERA5-Land, получены согласованные оценки притока в Балтийское и Белое моря. Выявлен контрастный пространственный паттерн: рост притока (2.1–2.9%/10 лет) на севере и востоке региона при отсутствии значимых трендов на юге Балтики. Установлен синхронный сдвиг гидрологического режима в 1977–1981 гг.

Ключевые слова: речной сток, Балтийское море, Белое море, многолетние тренды, точки перелома, ERA5-Land, GloFAS.

Речной сток — ключевой компонент водного и термического баланса полузамкнутых (Балтийское) и шельфовых (Белое) морей, напрямую влияющий на их экосистемы (Sotillo et al., 2021). Анализ его изменчивости в регионе затруднен сложной гидроклиматической динамикой (Филатов и др., 2019; Meier et al., 2022) и значительной пространственной неоднородностью данных наблюдений, когда оценки часто опираются на ограниченный набор крупных рек, не учитывая вклад малых водосборов (Shiklomanov et al., 2020). Цель работы — получить согласованные многолетние оценки притока и выявить закономерности его изменений в бассейнах Балтийского и Белого морей.

Исследование охватывает 17 подбассейнов (заливов морей, крупных озер) Балтийского и Белого морей (рис. 1).

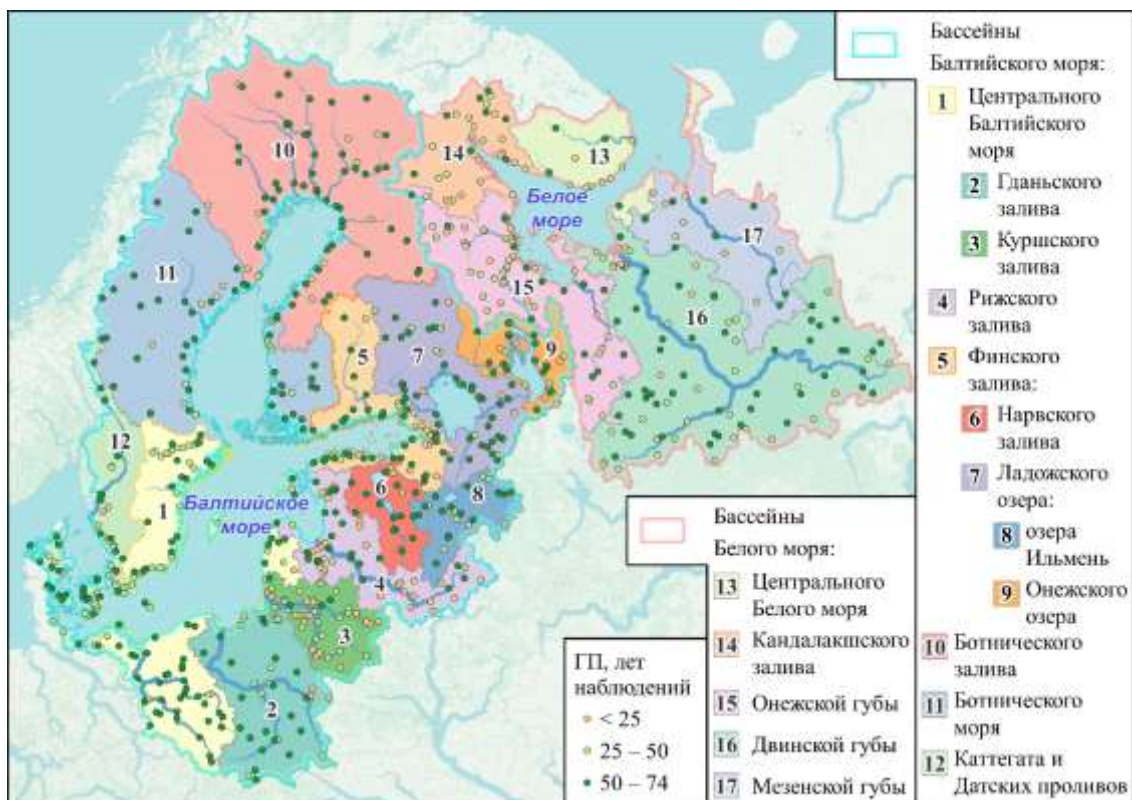


Рис. 1. Область исследования: бассейны акваторий и сеть гидропостов (1950–2023 гг.)

Сформированная база данных включает: 1) среднегодовые расходы воды по 830 гидрологическим постам за 1950–2023 гг. (40 421 значение), полученные из гидрологических ежегодников и международного портала GRDC¹⁷; 2) границы водосборов постов; 3) границы бассейнов морей и их подбассейнов. Границы водосборов гидрологических постов определены по ЦМР MERIT DEM¹⁸ (для РФ, с ручной коррекцией и верификацией по данным Росгидромета¹⁹) и по готовым полигонам GRDC (для зарубежных постов). Границы бассейнов морей и подбассейнов взяты из источников HELCOM²⁰ и HydroSHEDS²¹.

Для согласованной оценки интегрального притока в условиях неоднородной сети (средняя освещенность 78%) разработана комбинированная методика. Она включает: 1) прямой учет стока с изученных частей бассейнов по замыкающим створам; 2) оценку стока с неизученных территорий на основе пространственной интерполяции данных постов с площадью 1000–50000 км² (Рождественский, Лобанова, 2009) и 3) оценку стока с неизученных территорий с использованием скорректированного по наблюдениям реанализа ERA5-Land²². Коррекция ERA5-Land проведена по данным 341 поста (водосбор 1000–50000 км², ряд >10 лет, $r > 0.7$). Для обработки пространственных данных и корректного суммирования стока по иерархии водосборов был создан алгоритм на Python, автоматически определяющий вложенность бассейнов и исключающий дублирование данных о стоке при их пространственной агрегации.

Для анализа трендов годового стока использованы тест Манна-Кендалла (Mann, 1945) и метод Сена (Sen, 1968), для выявления точек перелома — комплекс тестов (SNHT (Alexandersson, 1986), Петтит (Pettitt, 1979), Бьюшанд (Buishand, 1982)). Для анализа изменений балансовых компонент дополнительно были привлечены данные ERA5-Land по осадкам (P) и испарению (E). Оценена сходимость данных наблюдений и стока (R), рассчитанного по реанализам ERA5-Land и GloFAS²³ за совместный период 1979–2023 гг.

Согласованность результатов двух методов оценки стока с неизученных территорий (интерполяция и скорректированный ERA5-Land) оказалась высокой ($r > 0.97$ при нормализованном среднеквадратическом отклонении менее 5%). Для последующего анализа использовано среднее по двум методам (табл. 1).

Таблица 1. Средний многолетний приток, тренды и точки перелома притока в акватории Балтийского и Белого морей (1950–2023 гг.)

Основные водные объекты	Площадь бассейна, тыс. км ²	Средний многолетний приток, мм	Тренд (%/10 лет) и его значимость	Год перелома тренда	P, мм	E, мм	R, мм
					ERA5-Land		
Балтийское море:	1758	282	0.9	1977	761	444	326
Центральное Балтийское море:	576	186	–1.1	2013	743	543	212
Гданьский залив	220	171	–0.9	–	753	564	199
Куршский залив	100	211	–1.4	–	734	535	213
Финский залив:	428	268	1.2	1981	745	452	297
Ладожское озеро:	263	280	2.2*	1981	751	450	302

¹⁷ https://grdc.bafg.de/data/data_portal/ (дата обращения 08.09.2025)

¹⁸ http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/ (дата обращения 20.02.2023)

¹⁹ <http://asunp.meteo.ru/portal/hydroweb/home> (дата обращения 03.03.2025)

²⁰ <https://maps.helcom.fi/website/mapservice/> (дата обращения 15.05.2025)

²¹ <https://www.hydrosheds.org/products/hydrobasins> (дата обращения 20.09.2025)

²² <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (дата обращения 21.07.2025)

²³ DOI: 10.24381/cds.a4fdd6b9 (дата обращения 19.01.2026)

Основные водные объекты	Площадь бассейна, тыс. км ²	Средний многолетний приток, мм	Тренд (%/10 лет) и его значимость	Год перелома тренда	Р, мм	Е, мм	Р, мм
					ERA5-Land		
Оз. Ильмень	66	239	2	1978	771	484	302
Онежское оз.	52	316	0.5	–	763	410	326
Нарвский залив	58	225	2.9*	1978	751	498	261
Ботнический залив	265	390	2.2*	1981	731	301	447
Ботническое море	232	401	1.1	1981	806	345	484
Рижский залив	138	238	0.7	1978	759	506	264
Каттегат и Датские проливы	118	376	0.7	–	845	438	424
Белое море:	721	318	1.3	–	694	359	337
Двинская губа	367	299	1	–	710	379	333
Онежская губа	138	312	2.4*	–	720	389	323
Кандалакшский залив	60	367	2.1*	–	648	278	377
Мезенская губа	105	346	0	–	676	320	360
Центральное Белое море	52	349	1.3	–	617	272	353

* значимый тренд

Средний многолетний слой стока варьирует от 173 мм/год (Гданьский залив) до 401 мм/год (Ботническое море). Более высокая водность Белого моря (318 мм/год) относительно Балтийского (282 мм/год) обусловлена меньшим испарением при сравнимых осадках. Выявлена выраженная пространственная дифференциация трендов за 1950–2023 гг. (рис. 2).

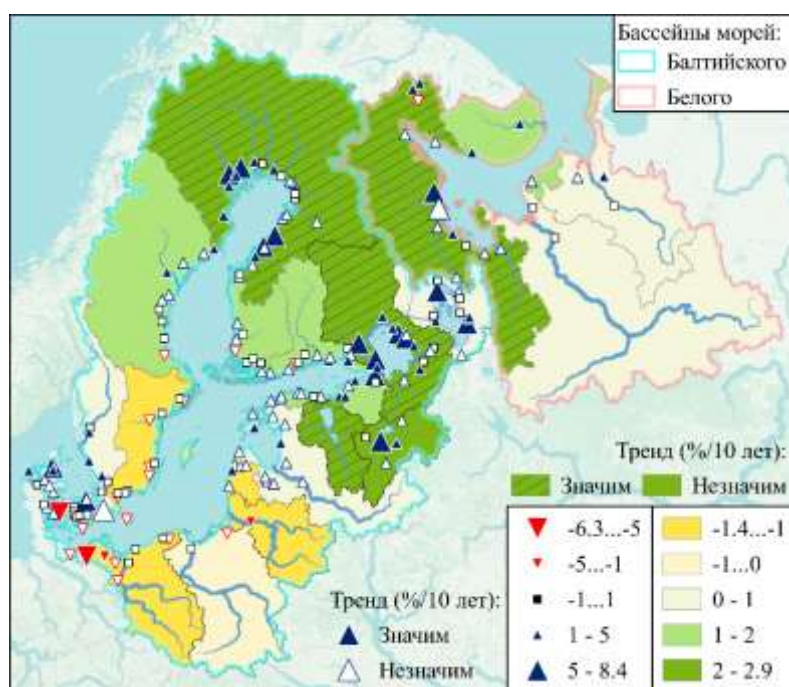


Рис. 2. Тренды (%/10 лет) среднегодового притока к акваториям, а также для замыкающих створов рек за многолетний период (1950–2023 гг.)

Статистически значимый рост притока (2.1–2.9%/10 лет) характерен для северных и северо-восточных акваторий: Нарвский и Ботнический заливы, Онежская и Кандалакшская губы, Ладожское озеро. Для центральной и южной Балтики тренды отрицательны или незначимы (–1.4 до –0.9%/10 лет). Анализ точек перелома рядов выявил синхронный сдвиг гидрологического режима в 1977–1981 гг. для большей части Балтийского моря. Сравнение периодов до и после 1978 г. показало наибольший абсолютный прирост стока в Нарвском заливе (+50 мм), Ботническом и Кандалакшском заливах (+37–38 мм). При этом в зонах роста водности межгодовая изменчивость (C_v) снизилась, а в центральной и южной Балтике — возросла или не изменилась.

Верификация полученных рядов с глобальными продуктами за 1979–2023 гг. показала высокую согласованность межгодовой динамики (среднее $r = 0.87$ с GloFAS и 0.83 с ERA5-Land). Количественно оценено систематическое смещение: данные ERA5-Land завывают сток в среднем на +25 мм/год, тогда как смещение GloFAS пространственно неоднородно (занижение в большинстве акваторий (–10–20 мм/год) и завывание в бассейне Финского залива (+20–50 мм/год)).

Анализ компонент водного баланса по ERA5-Land показал, что на юге Балтики динамика стока лимитируется опережающим ростом испарения. На севере и северо-востоке наблюдаемый рост стока не объясняется однозначно изменениями среднегодового баланса осадков и испарения, что указывает на важную роль иных факторов.

Список литературы:

- Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: ГУ ГГИ, 2009. 193 с.
- Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Дружинин П.В. Влияние климатических и антропогенных факторов на состояние системы "Белое море-водосбор" // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2019. № 9. С. 30–50.
- Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data // Journal of Climatology. 1986. Vol. 6. Iss. 6. P. 661–675.
- Buishand T.A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records // Journal of Hydrology. 1982. Vol. 58. Iss. 1–2. P. 11–27.
- Mann H.B. Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. Vol. 13. P. 245–259.
- Meier H.E.M., Kniesbusch M., Dieterich C., Gröger M., et al. Climate change in the Baltic Sea region: a summary // Earth System Dynamics. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 457–593. DOI: 10.5194/esd-13-457-2022
- Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics). 1979. Vol. 28. Iss. 2. P. 126–135.
- Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // Journal of the American Statistical Association. 1968. Vol. 63. Iss. 324. P. 1379–1389.
- Shiklomanov A., Déry S., Tretiakov M., Yang D., et al. River freshwater flux to the Arctic Ocean // Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 703–738. DOI: 10.1007/978-3-030-50930-9_24
- Sotillo M.G., Campuzano F., Guihou K., et al. River freshwater contribution in operational ocean models along the European Atlantic façade: impact of a new river discharge forcing data on the CMEMS IBI regional model solution // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 4. P.401. DOI: 10.3390/jmse9040401

УДК 556.535

ИЗМЕНЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ РЕКИ ЛЕНА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

Лебедева Л.С.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия,
lyudmilaslebedeva@gmail.com

Аннотация. На основе наблюдений на 19 гидропостах Лены и ее крупнейших притоков выполнена оценка пространственных различий и многолетних изменений годового стока, максимальных и минимальных суточных расходов и сроков их прохождения. Показано, что при отсутствии роста годового стока происходит перераспределение внутри года: в верховьях уменьшаются пики половодья, а в среднем и нижнем течении растет сток зимней межени. Выявлен каскадный характер изменений, связанный с контрастами мерзлотно-ландшафтных условий и влиянием зарегулированности стока р. Вилюй.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, речной сток, половодье, зимняя межень, сезонность, зарегулирование, река Лена.

В последние десятилетия для арктических и субарктических рек показаны разнонаправленные изменения стока, которые могут быть обусловлены как климатическими факторами, так и антропогенным воздействием (Ye et al., 2003; Berezovskaya et al., 2005; Rawlins et al., 2009; Patro et al., 2024). Особое значение имеет рост минимальных расходов воды, интерпретируемый как усиление роли подземного питания в высоких широтах (Smith et al., 2007) и как следствие изменения водообмена в мерзлотных ландшафтах (Георгиади, Кашутина, 2014; Георгиади и др., 2024; Walvoord, Kurylyk, 2016; Bring et al., 2016).

Цель работы – выявить изменения характеристик стока р. Лены и оценить их связь с пространственной неоднородностью мерзлотных, климатических и ландшафтных условий, а также с влиянием регулирования стока Вилюйским водохранилищем.

Использованы ряды наблюдений суточных расходов воды за 1978–2022 гг. на 19 гидропостах: 9 постов на Лене, 6 на Алдане и 4 на Вилюе. Площади водосборов составляют 4570–2430000 км²; среднегодовые слои стока 118–389 мм/год; среднегодовая температура воздуха по бассейнам варьирует от –3.2 до –10.6 °С, годовая сумма осадков от 298 до 576 мм/год. Для каждого поста оценены: (1) годовой сток; (2) максимальный суточный расход и дата его прохождения; (3) минимальный суточный расход и дата его прохождения; (4) показатели сезонности, включая отношение максимального расхода к минимальному ($Q_{\max}/Q_{\min}$).

Среднемноголетние характеристики стока существенно различаются между крупнейшими притоками р. Лены. На Алдане среднегодовые слои стока максимальны (258–389 мм/год), на Вилюе минимальны (118–212 мм/год), а верхняя Лена занимает промежуточное положение (139–338 мм/год). Для Лены наблюдаются аномально низкие слои стока на трех постах в верхнем течении (Качуг, Усть-Кут, Таюра), что сопровождается высокой долей закарстованности и сравнительно меньшей долей покрытия многолетнемерзлыми породами (ММП). Ниже по течению доля ММП на водосборах возрастает: для бассейна Лены — от 34–55% в верховьях до 87% в замыкающем створе; для Алдана — от 84 до 94%; для Вилюя — 92–99%. Это определяет более выраженную сезонность стока и рост соотношения $Q_{\max}/Q_{\min}$ по мере увеличения доли ММП.

Многолетний тренд годового стока в целом отсутствует: на большинстве постов получены околонулевые и статистически незначимые изменения. Единственный значимый тренд обнаружен в верховьях Лены на посту Усть-Кут, где сток уменьшается на 12.5%/10 лет. Корреляционный анализ показывает, что годовой сток на всех постах Алдана имеет тесную связь со стоком Лены в замыкающем створе ($r=0.69–0.76$) практически вне зависимости от площади водосбора, тогда как самые верхние посты Лены (Чанчур, Качуг и Усть-Кут) не

имеют связи со стоком в Кюсюре. Ниже по течению (начиная с поста Таюра) связь становится статистически значимой и усиливается по мере увеличения площади водосбора. Расходы Вилюя демонстрируют сходную закономерность, но коэффициенты корреляции ниже ($r=0.35-0.55$).

Максимальные суточные расходы статистически значимо уменьшаются на четырех постах в верховьях Лены и на одном посту в верховьях Алдана; величины трендов составляют 6–14%/10 лет. Для остальных постов изменения максимальных расходов близки к нулю, с переходом от отрицательных трендов в верхнем течении к слабоположительным в низовьях. Даты прохождения максимальных расходов смещаются на более ранние на большинстве постов; статистически значимое смещение отмечено в верховьях Лены (2.9 дня/10 лет), на одном посту Алдана (2.5 дня/10 лет) и в замыкающем створе Лены (2 дня/10 лет), а также на всех постах Вилюя ниже водохранилища.

Минимальные суточные расходы статистически значимо растут на всем протяжении Алдана на 7.6–17.2%/10 лет и в среднем и нижнем течении Лены на 7.5–8.9%/10 лет. В верховьях Лены для двух постов получены отрицательные, но статистически незначимые тренды. Среднемноголетняя дата минимального расхода для Лены и Алдана изменяется вверх по течению от января-марта к марту-апрелю вниз по течению. Для Вилюя характерен резкий контраст: выше плотины минимум приходится на середину апреля, тогда как ниже водохранилища минимум смещен на август–октябрь вследствие сезонного регулирования стока.

Результаты указывают на перераспределение стока внутри года при стабильных годовых объемах: снижение пиков половодья и их более раннее прохождение в верховьях сочетаются с ростом зимней межени в среднем и нижнем течении. С учетом неоднородности распространения ММП, лесистости и закарстованности, а также Вилюйских водохранилищ, эти изменения интерпретируются как каскадная трансформация водного баланса бассейна. Предполагаемый механизм включает увеличение потерь воды в конце теплого периода в районах прерывистых деградирующих ММП и развитого карста в верхних частях бассейнов и одновременное усиление подземного питания вниз по течению за счет формирования более протяженных подземных путей стока и роста доли подземных вод в меженный период.

Практическое значение выявленных тенденций связано с прогнозированием и управлением водных ресурсов. Рост зимних расходов влияет на работу водозаборов, условия ледового режима, эксплуатацию зимников и ледовых переправ, а снижение и смещение максимумов половодья меняет риски наводнений. Для корректных сценарных оценок необходима совместная интерпретация климатических факторов и антропогенной трансформации стока в бассейнах с крупными водохранилищами, а также учет пространственной неоднородности мерзлотных условий и связанных с ними изменений взаимодействия между поверхностными и подземными водами.

Исследование выполнено в рамках проекта НИОКТР 126020516689-6 "Подземные воды криолитозоны, особенности их взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами".

Список литературы:

Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Многолетние изменения годового и сезонного стока рек бассейна Лены // Известия РАН. Серия географическая. 2014. № 2. С. 71–83. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-2-71-83.

Георгиади А.Г., Милукова И.П., Бородин О.О., Барабанова Е.А. Речной сток крупнейших рек России в условиях современного и сценарного глобального потепления // Известия РАН. Серия географическая. 2024. Т. 88. № 6. С. 855–866. DOI: 10.31857/S2587556624060011.

- Berezovskaya S., Yang D., Hinzman L. Long-term annual water balance analysis of the Lena River // *Global and Planetary Change*. 2005. Vol. 48. Iss. 1–3. P. 84–95. DOI:10.1016/j.gloplacha.2004.12.006.
- Bring A., Fedorova I., Dibike Y., et al. Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects and research challenges // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2016. Vol. 121. DOI:10.1002/2015JG003131.
- Patro E.R., Ghadimi S., Shahrood A.J., et al. Flow regime alteration in Arctic rivers due to dam operations and climate change // *Global and Planetary Change*. 2024. Vol. 237. 104442. DOI:10.1016/j.gloplacha.2024.104442.
- Rawlins M.A., Ye H., Yang D., Shiklomanov A., McDonald K.C. Divergence in seasonal hydrology across northern Eurasia: Emerging trends and water cycle linkages // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. Vol. 114. D18119. DOI:10.1029/2009JD011747.
- Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M., Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Rising minimum daily flows in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2007. Vol. 112. G04S47. DOI:10.1029/2006JG000327.
- Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost—A review // *Vadose Zone Journal*. 2016. Vol. 15. Iss. 6. DOI:10.2136/vzj2016.01.0010.
- Ye B., Yang D., Kane D.L. Changes in Lena River streamflow hydrology: Human impacts versus natural variations // *Water Resources Research*. 2003. Vol. 39. No. 7. 1200. DOI:10.1029/2003WR001991.

УДК 556.16

СОВРЕМЕННЫЕ И НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ АТР

Магрицкий Д.В.

Московский государственный университет, Москва, Россия

magdima@yandex.ru

Аннотация. Под влиянием климатических изменений общая водность главных рек региона увеличилась на 17–23%, за исключением рек Чукотки. Отмечены положительные аномалии у максимальных расходов и уровней воды, изменения в их внутригодовом распределении. В результате риски затоплений и наводнений в регионе выросли.

Ключевые слова: река, пойма, пост, уровень, критическая отметка, наводнение

Проведен детальный анализ ситуации с затоплениями поймы и речными наводнениями на Северо-Востоке азиатской части страны (далее АТР, регион), охватывающем северо-восточные улусы республики Саха (Якутия), Чукотский АО и Магаданскую обл., бассейны рек Яны, Индигирки, Алазеи, Колымы, Анадыря, бассейнов Чукотского и Охотского морей. Здесь наводнения сопровождаются затоплениями в населенных пунктах, аэродромов и портовой инфраструктуры, приводят к размыву автомобильных дорог и обрушению мостов, прорыву дамб хвостохранилищ, нарушают работу горнодобывающих предприятий, увеличивая экологические риски (Агафонова и др., 2019; Атлас..., 2007; Колесов, 1993; Парфенова, 2017; Сулейманов, 2022; Таратунин, 2000 и др.). В условиях климатического потепления, изменения гидрологического режима рек и состояния многолетнемерзлых пород, расширения хозяйственной деятельности, прежде всего связанной с добычей полезных ископаемых, ситуация с наводнениями и ущербом от них лишь усугубляется. Подтверждением этому служат 2 больших наводнения с разрушением мостов в июле и августе 2025 г. в бассейне Колымы.

Материалы и методы. Регион включает реки Омолой, Яна, Индигирка, Алазея, Колыма, Амгуэма, Анадырь и сравнительно небольшие реки Магаданской области, относящиеся к бассейну Охотского моря (рис. 1). Это территория, главным образом, сплошной мерзлоты, на равнинах представленной высокольдистыми и мощными едомными отложениями, преобладания горного рельефа. Был отобран 71 гидрологический пост с продолжительными рядами уровенных наблюдений, сформирована электронная база данных среднесуточных и максимальных срочных уровней, а также – по стоковым постам – ряды среднемесячных, среднегодовых и максимальных расходов воды, по состоянию на 2023 г. Для постов были идентифицированы критические высотные отметки – затопления поймы и опасного гидрологического явления. Источником сведений о них послужили гидрологические ежегодники, информация на сайтах УГМС, региональных подразделений МЧС и муниципальных образований, оперативные сводки во время самих наводнений, а также «Ресурсы поверхностных вод СССР» (Ресурсы..., 1969, 1972). На части постов отметки ОЯ в высотном отношении ниже отметок затопления поймы. На основе данных по уровням сформированы многолетние ряды: максимальных срочных уровней и дат их наблюдения - отдельно для мая, июня, июля, августа и сентября, и максимальных за год; продолжительности превышения максимальными уровнями отметок затопления поймы и ОЯ; максимальных глубин затопления поймы, как разности между максимальными уровнями и отметками выхода воды на пойму. Отдельным этапом подготовки информационной основы исследований стало создание Базы данных детализированных сведений о прошлых речных наводнениях. Проведен детальный статистический, графический, картографический анализ гидрометеорологических условий современного изменения ситуации с затоплениями и наводнениями в регионе.

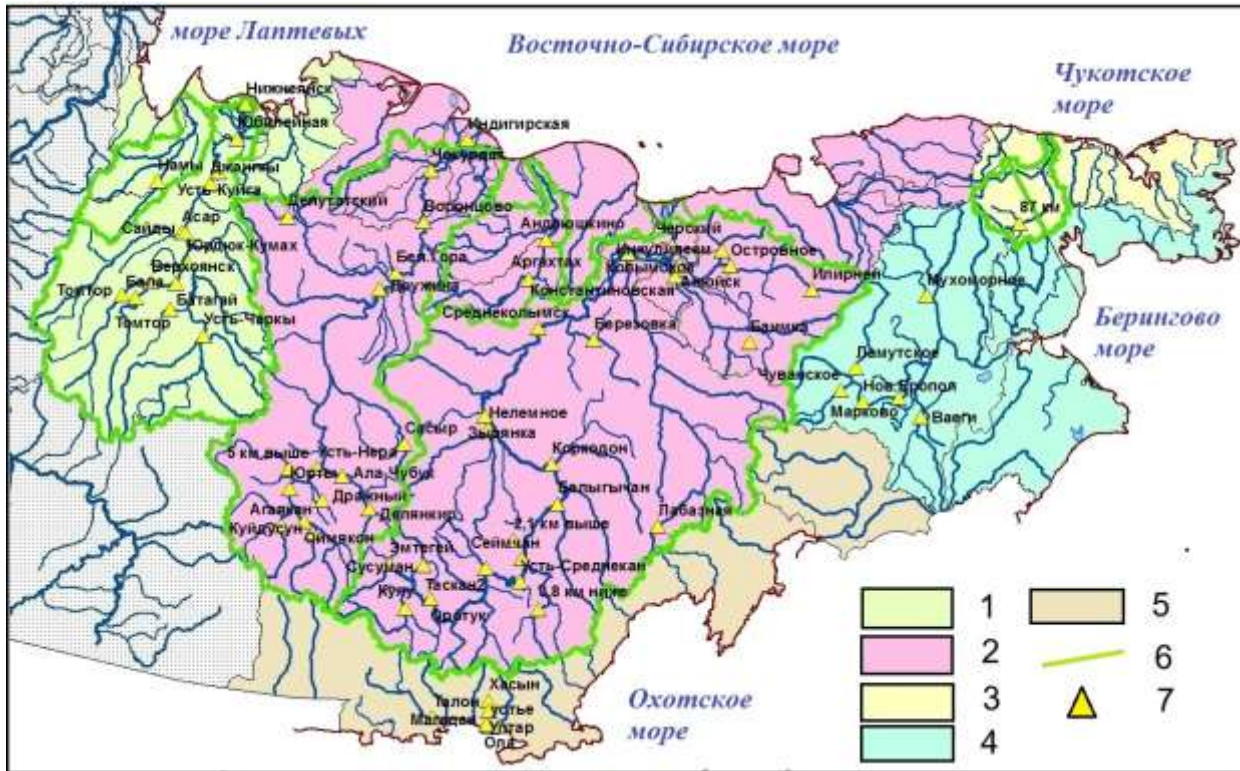


Рис. 1. Северо-восток АТР с указанием границ водосборных бассейнов морей, местоположения и названия гидрологических постов.

Водосборные бассейны морей (в пределах рассматриваемого региона): 1 – Лаптевых, 2 – Восточно-Сибирского, 3 – Чукотского, 4 – Берингова, 5 – Охотского; 6 – границы водосборов крупных рек, впадающих моря российской Арктики, 7 – гидрологические посты (с подписями)

Климатические и гидрологические изменения в регионе. На Северо-востоке АТР заметное потепление климата фиксируется главным образом с 1988 г., но к востоку от Индигирки оно выражено с середины 1990-х гг. (Второй..., 2014; Магрицкий, 2015, 2023). С середины 2000-х гг. отмечен очередной рост температур, с новым и скачкообразным повышением в последние 15–10 лет. Среднее положительное отклонение годовых температур (от величин 1961–1990 гг.) равно 1.2–2.5°C, и оно обеспечивается за счет всех календарных сезонов. Причем в переходные сезоны рост выше, чем летом. Пространственная и временная структура изменений слоя осадков более неоднородна. Однако, для основной части региона 1981–2019-е годы характеризуются, в целом, повышенной суммой осадков – в среднем на 10–20 мм. Основное увеличение произошло в бассейнах Индигирки и Колымы, тогда как зоны с отрицательными аномалиями занимают побережье арктических морей, северное побережье Охотского моря. Рост осадков фиксируется, в основном, с середины 1990-х гг. (и даже еще позже). Следующий этап увеличения осадков, как правило, более выраженного, зафиксирован с середины 2000-х гг. При этом основной вклад внесли летние и осенние (наиболее опасные) осадки.

Как следствие климатических изменений, общая водность (на ~17–23%) и максимальный сток главных рек АТР, в целом, увеличились с середины 1990-х гг. и особенно с 2004 г., за исключением рек бассейнов Чукотского моря и Анадыря. Это согласуется с выводами, содержащимися в более ранних работах (Магрицкий и др., 2025, Научно-прикладной..., 2021, Frolova et al., 2022). Лидер – р. Алазея, чей годовой сток и максимальные расходы выросли на 69 и 21%, по сравнению с периодом до 1996 г. Увеличение максимальных расходов половодья и летне-осенних дождевых паводков неодинаковое. Отмечено изменение

дат прохождения максимальных расходов. Так, в бассейне Яны пиковые расходы половодья смещаются на более ранние даты прохождения (до 5 сут.), максимальные расходы летне-осенних паводков – на более поздние даты (до 1–2 нед.).

Затопления и наводнения в регионе. Установлено, что потенциально опасные уровни могут наблюдаться на реках региона в любой из месяцев с мая по сентябрь, но чаще с мая по август. Доля конкретного месяца меняется в зависимости от местоположения, климатических особенностей, размеров и орографического строения бассейна, гидрологического режима реки. Она увеличивается для мая и июня (основных месяцев весеннего половодья) до 90–100% к низовьям рек и к арктическому побережью, в северо-восточной части региона (в бассейнах Анадыря и Амгуэмы), с увеличением размера реки и ростом доли равнинной части водосбора. В среднем она лежит в диапазоне от 44 до 60% в бассейне Яны (с наименьшими значениями на реках, стекающих со склонов Верхоянского хр.), от 30 до 55% в бассейне Индигирки (с наименьшими значениями в южной, горной части бассейна), от 40–50 до 80–90% в бассейне Колымы. Эти максимумы формируются не только максимальными расходами воды, но и заторами льда. Обратная закономерность у месяцев прохождения паводков – июля, августа и сентября. Причем июль – это переходный месяц между двумя гидрологическими сезонами, в итоге его доля в распределении случаев наблюдения максимальных уровней по месяцам (за многолетний период) довольно высокая в бассейнах Яны и Индигирки (за исключением их низовьев), в самых верховьях Колымы – от 20 до 40%, с наибольшими значениями в верхней части Алазеи – 52.7%. Следующий по опасности месяц – это август. На ряде постов в южной части бассейна Индигирки, в верхней и средней части Колымы, на охотоморском побережье его доля выше, чем у июля.

Затопление поймы на реках региона случается не чаще 1 раза за 2–3 года и реже, причем за сезон может повторяться. Каждый год пойма затоплялась на посту пгт Депутатский (р. Иргичээн). Средняя глубина затопления поймы обычно не превышает 1–1.5 м, максимальная – 2–3.2 м. Она регулируется как высотой подъема уровня, так и морфологическим строением русла и поймы на участке поста. Средняя продолжительность затопления поймы варьирует от 1.5–2.5 сут. до 1–1.5 нед. Максимальная глубина может достигать 2–3.2 м и даже больше: р. Яна, пост Сайды – 3.5 м, р. Иргичээн – 4.4 м, р. Бол. Анюй (пост Константиновская) – 5.7 м. Превышение ОЯ происходит в среднем 1 раз в 5–20 лет и реже, но у 25% пунктов ОЯ ниже отметок затопления поймы. Максимальная продолжительность периода с $H_{\text{макс}} > H_{\text{ОЯ}}$ от 2–5 сут. до 1 мес. с аномально высокими значениями на р. Алазея – до нескольких месяцев в 2007 г. Средняя продолжительность – <4–8.5 сут.

Увеличение опасности затоплений и наводнений в регионе фиксируется с середины 1990-х и середины 2000-х гг. (переломным выбран 1996 г.). Исключение составляют реки на крайнем северо-востоке региона. В современный гидрометеорологический период – с 1990-х гг. – большие наводнения были в 1991, 1995–2000, 2004, 2006–2009, 2013, 2014, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023, 2025 гг. Особенно сложная ситуация на Алазее, где помимо гидрологических факторов, существенную негативную роль играет деградация едомных мерзлотных отложений, сопровождаемая понижением высотных отметок, активизацией русловых процессов, спуском термокарстовых озер. Для подавляющего большинства постов отмечен рост максимальных уровней воды в среднем на 0.2–0.4 м (табл. 1). Также доминирует рост повторяемости выхода речных вод на пойму – от +5...+10% до +20...+30% и больше (отсутствие изменений или даже снижение повторяемости отмечено на северо-востоке региона). Изменения же глубины затопления (Δh) неоднозначны, но постов с ее увеличением больше (с максимальными показателями +0.5...+1 м, прежде всего в бассейнах Яны и Индигирки).

Таблица 1. Изменения в характеристиках максимальных уровней и затопления поймы с 1960 по 1995 г. и после 1995 г.

Река-пост	$\Delta H_{\text{макс}}$, см	ΔD , сут.	Δh , м	Повторяемость затопления поймы, %	
				до 1995 г.	1996-2023 гг.
Яна – Верхоянск	+30	-9	+0.05	53	61
Яна – Батагай	+22	-7	-0.15	22	36
Яна – Юбилейная	+49	+3	+0.16	53	61
Сартанг – Бала	+27	-5	-0.22	8	36
Дулгалаах – Томтор	+27	-9	+1.06	6	11
Адыча – Усть-Чаркы	+22	-6	-	-	-
Адыча – Юрдюк-Кумах	+44	+7	-0.07	28	36
Борулах – Томтор	+40	-8	0	26	25
Бытантай – Асар	+19	-10	+0.23	31	36
Индиگیرка – Оймәкөн	+8	+6	+0.31	14	26
Индиگیرка – Юрты	-3	-14	-3	0	0
Индиگیرка – Усть-Нера	-5	-9	+0.70	0	7
Индиگیرка – Чокурдах	+25	-2	-	-	-
Эльги – 5 км выше...*	+34	+17	+0.15	48	64
Нера – Ала-Чубук*	+62	+3	+0.47	26	36
Делянكير – Делянكير*	+23	+11	+0.19	90	100
Алазея – Аргахтаһ	+47	+6	+0.22	44	63
Колыма – Оротук	-50	+10	-0.13	47	26
Колыма – У.-Среднекан	-14	+24	0	0	0
Колыма – Сеймчан*	-15	+30	-0.26	44	24
Колыма – Балыгычан	+3	+16	-	3	0
Колыма – Коркодон	-4	-1	-0.45	30	48
Колыма – Зырянка	+27	-4	-0.24	33	43
Колыма – Среднеколымск	+25	-2	+0.23	36	39
Колыма – Колымское*	+12	-4	+0.22	87	86
Берелёх – Сусуман	-5	+14	-0.01	14	21
Кулу – Кулу	+23	+11	+0.02	34	61
Березовка – Березовка*	+29	+2	+0.11	59	79
Омолон – Лабазная	+12	-10	+0.13	3	8
М.Ануй – Островное	+31	-5	+0.03	61	96
М.Ануй – Ануйск	+12	-15	0	89	96
Погынден – устье Инкуливеем	+4	-5	-0.18	38	22
Анадырь – Марково*	+47	0	+0.32	62	81
Майн – Ваеги*	-6	-7	0	100	96
Энмываам – Мухоморное	-28	-4	-0.13	47	38
Хасын – Хасын*	-12	+2	+0.03	38	31
Тауй – Талон	+50	+21	+0.39	65	77

*данные не за полный период

Исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 24-17-00084

Список литературы:

Агафонова С.А., Магрицкий Д.В., Романенко Ф.А., Банщикова Л.С. Наводнения на реках и побережьях Арктической зоны России // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сб. науч. трудов. М.: Студия Ф1, 2019. С. 86–91.

Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. ДФО России. М., 2007. 325 с.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М, 2014. 1018 с

Колесов М. И. История Колымского края // Советский период. Ч. II. Якутск, 1993. 217 с.

Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 85–95.

Магрицкий Д.В. Климатические изменения на северо-востоке азиатской части России // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 2023. С. 345-353.

Магрицкий Д.В., Школьный Д.И., Илюшина П.Г. Природно-антропогенные изменения стока наносов рек в бассейне Индигирки // Известия Русского географического общества. 2025. Том 157. № 3. С. 394-415.

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.

Парфенова О.Т. Экономическая оценка и возмещение ущерба от наводнений на северных реках Республики Саха (Якутия) / Диссертация на соиск. уч. степ. канд. экон. наук. Якутск, 2017. 165 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Индигирский район. Л., 1972. 652 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 19. Северо-Восток. Л., 1969. 280 с.

Сулейманов А.А. Последствия наводнений и деградации многолетней мерзлоты для системы жизнеобеспечения населения бассейна реки Алазея (на материалах второй половины XX—XXI веков) // Научный диалог. 2022. Т. 11. № 8. С. 470–487.

Таратунин А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. Екатеринбург, 2000. 355 с.

Frolova N.L., Magritsky D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu, Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data // Water Resources. 2022. Vol. 49(3). Pp. 333–350.

УДК 551.579

ИСПАРЯЕМОСТЬ, ИСПАРЕНИЕ И ВЛАЖНОСТЬ ПОЧВЫ В ГОРАХ ЮЖНОЙ СИБИРИ

Парфенова Е.И., Чебакова Н.М.

Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия, lyeti@ksc.krasn.ru

Аннотация. В работе анализируются связи распределения высотно-поясных комплексов растительности (ВПК) с влажностью почвы в горах Южной Сибири (80–110° в.д. и 50–58° с.ш.). Для расчета влажности почвы использовался теоретический подход М. И. Будыко. Запасы продуктивной влаги в верхнем 1-метровом слое почвы для основных ВПК региона (тундра, темнохвойный лес, светлохвойный лес и степь) рассчитывали как отношение фактического испарения к испаряемости. Сравнение расчетной влажности почвы с данными реанализа MERRA2 показало, что они скоррелированы для слоя глубиной 1 м ($r = 0.66$). Влажность почвы характеризуется определенным диапазоном значений в различных ВПК.

Ключевые слова: продуктивная влага почвы, теплобалансовый метод М. И. Будыко, данные реанализа MERRA2.

В.В. Докучаев в конце XIX века установил, что климат является ведущим фактором, определяющим зональность растительности и почв на суше (Докучаев, 1948). На равнинных территориях вследствие однородности климата на большом протяжении влияние почвы на растительность выходит на первый план, что отражено, например, в классификации лесорастительных условий Воробьева-Алексеева-Погребняка (Фомин и др., 2023). Для горных территорий роль почвы отходит на второй план, а распределение лесообразующих пород контролирует климатический «каркас» территории (Поликарпов и др., 1986). При этом среди почвенных характеристик в наибольшей степени на распределение древесных пород и их продуктивность влияют гидротермические свойства почвы, являющиеся функцией климата приземного слоя и механического состава почвы (Поликарпов и др., 1986).

Цель настоящей работы – установить зависимость влажности почвы от водного баланса и механического состава почвы для лесных территорий в горах Южной Сибири и поверить наши расчетные результаты данными реанализа MERRA2.

Объекты и методы

На территории гор Южной Сибири в окне 80–110° в.д. и 50–58° с.ш. были выбраны 50 метеостанций, для характеристики климата высотно-поясных комплексов растительности (ВПК): тундрового, лесного (темнохвойного и светлохвойного) и степного. Для этих станций были выполнены расчеты испаряемости по теплобалансовому методу М.И. Будыко и испарения по методу уравнивания связи М. И. Будыко (1971) для базового периода (1961–1990). В расчетах были использованы среднемесячные данные по температуре воздуха, количеству осадков, дефициту влажности воздуха, суммарной радиации, общей облачности и альбедо (определенного с учетом дат установления и схода снежного покрова).

По уравнению (Зубенок, 1976) были найдены значения *продуктивной* влаги в 1-метровом слое почвы:

$$W = W_0 \times E/E_0, \quad (1)$$

где W – продуктивная влага в 1-метровом слое почвы (в см); W_0 – критическая влажность почвы; E – испарение, рассчитанное по уравнению связи Будыко; E_0 – испаряемость, рассчитанная по теплобалансовому методу. По данным The Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) для нашего окна были выделены и усреднены июньские данные по влажности почвы реанализа MERRA2 за период 1980-1990. По координатам точек метеостанций, для которых была рассчитана влажность почвы по методу М. И. Будыко, были найдены значения влажности почвы по данным MERRA2 и проведено их сравнение (рис. 1). Также для нашего

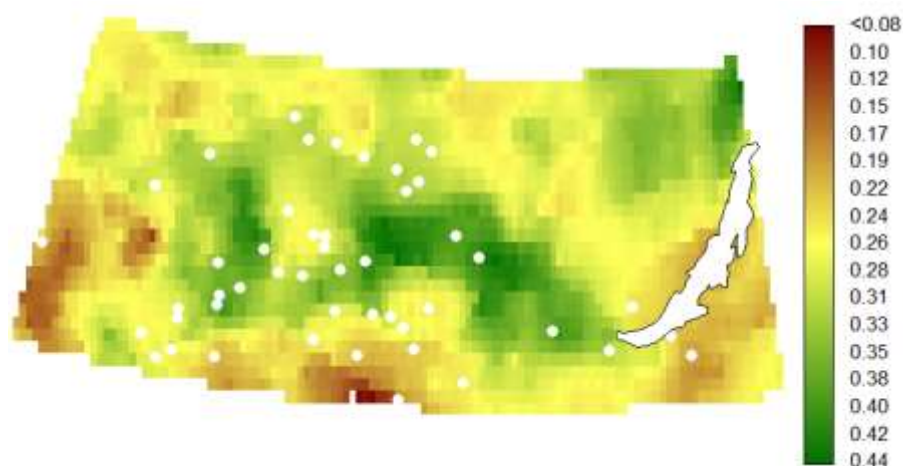


Рис. 1. Распределение влажности почвы ($\text{м}^3/\text{м}^3$) по данным MERRA2; белыми точками обозначены метеостанции. В правой части рисунка – абрис оз. Байкал (https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/data_access/; дата обращения 28.01.2026)

региона были получены данные по распределению фракций механического состава почвы: песка, глины и ила (рис. 2).

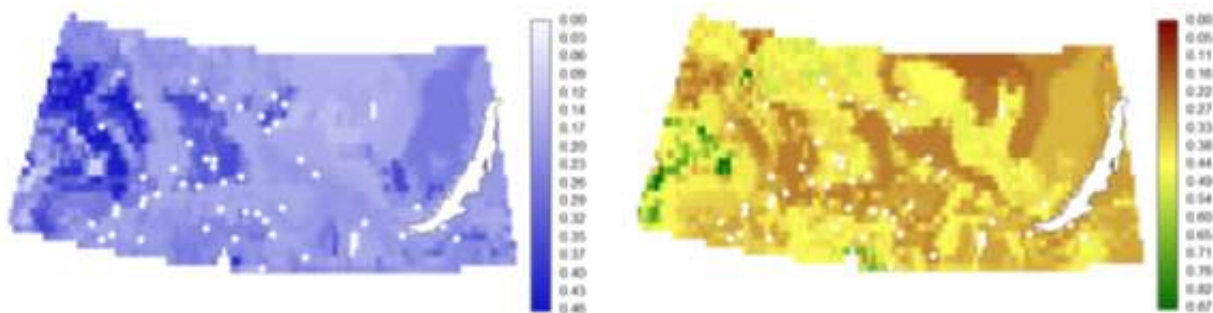


Рис. 2. Распределение фракций глины и песка для региона исследований (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/soils>; дата обращения 28.01.2026)

По уравнению (1) можно рассчитать отношение E/E_0 , а затем и продуктивную влагу в любой точке суши, однако это требует знания нескольких показателей, получаемых на метеостанциях и справедливых для их координат. Для того, чтобы построить климатические слои для всей территории нашего региона, мы нашли регрессионную зависимость E и E_0 от температуры и осадков любого месяца вегетационного периода с положительными температурами. Регрессионный анализ был проведен в пакете STATISTICA.

Результаты

На рис. 1. показано распределение влажности почвы в 1-метровом слое по данным реанализа MERRA2 для июня, усредненное за период 1980–1990. Точками обозначены метеостанции, для которых был проведен расчет влажности почвы по теплобалансовому методу за базовый период. Значения влагозапасов в почве, полученные двумя методами существенно различаются. Однако, между ними существует значительная корреляционная связь ($r = 0.57$).

Включение в регрессионное уравнение данных о фракционном составе почвы (рис. 2), увеличивает коэффициент корреляции до (0.66). Коэффициент корреляции между ΔW (разностью значений продуктивной влаги, полученной по теплобалансовому методу, и

данными MERRA2) и данными MERRA2 повышается до 0.91 (рис. 3), что позволяет использовать эту зависимость для калибровки данных MERRA2 при определении содержания продуктивной влаги.

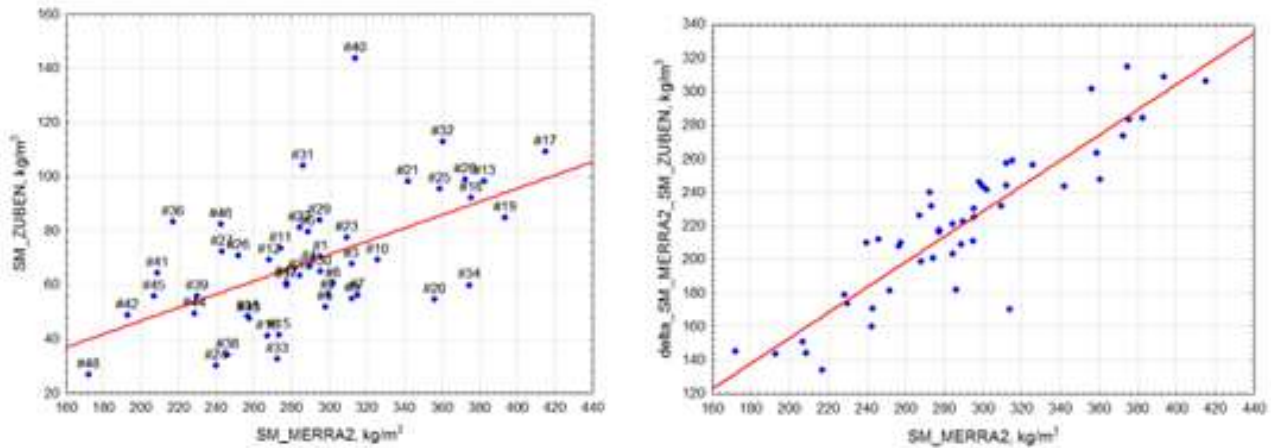


Рис. 3. Зависимость между значениями продуктивной влаги, рассчитанной теплобалансовым методом, и данными MERRA2 для июня (слева); зависимость delta W от значений MERRA2 (справа)

Фактические значения запаса продуктивной влаги почвы за вегетационный период были рассчитаны по уравнению (1) для пятидесяти метеостанций и затем усреднены для каждого ВПК (рис. 4). Сезонные изменения влажности почвы в четырех ВПК были синхронными, а различия между ними были обусловлены различиями энергетических и водных ресурсов в ВПК, расположенных на разных высотах и горных хребтах, ориентированных по отношению к западному переносу влагонесущих воздушных масс из Атлантики.

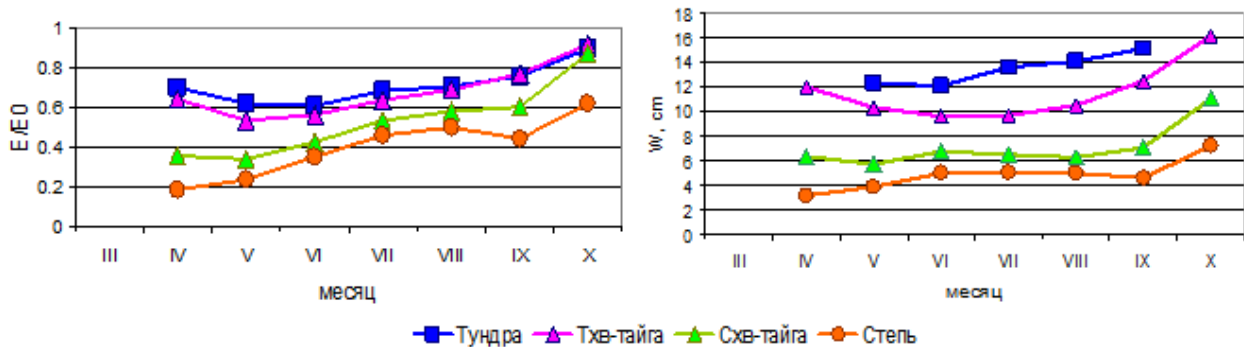


Рис. 4. Сезонный ход отношения E/E_0 (слева) и запасов продуктивной влаги (справа) в четырех основных ВПК: тундра, темнохвойный лес, светлохвойный лес, степь

Так, в степях, продуктивная влага в почве колебалась от 3–4 см весной до 5 см летом и несколько меньше ранней осенью; в светлохвойных лесах она колебалась от 6 см весной и летом до 7 см осенью; в темнохвойных лесах она колебалась от 12 см весной до 10 см летом и вновь до 12 см осенью; в тундре влажность почвы стабильно изменялась от 12 см весной до 15 см осенью.

Расчетные показатели влажности почвы показали хорошее согласие с измерениями на сельскохозяйственных станциях (Агроклиматические ресурсы..., 1973), что доказало надежность модельных подходов. Как следует из рис. 3 (слева), смоделированная доступная влажность почвы ограничивает основные диапазоны трех ВПК (кг/м³): < 55 для степи, 55–80 для светлохвойных лесов, > 80 для темнохвойных лесов.

Также мы нашли зависимость испаряемости и испарения от среднемесячной температуры и осадков для месяцев с положительными температурами:

$$E_0 = 6.15 + 0.41 \times t; n=412; R^2=0.66; p<0.0000, \quad (2)$$

$$E = 1.00 + 0.04 \times p + 0.11 \times t; n=412; R^2=0.86; p<0.0000, \quad (3)$$

где: t – среднемесячная температура, °C; p – осадки за месяц, мм.

Эти зависимости полезны для расчета влажности почвы при моделировании последствий прогнозного изменения климата.

Заключение

Показано, что в горных условиях влажность почвы является величиной, характерной для различных типов растительности, которую можно рассчитать на основе теоретических моделей с использованием стандартных климатических параметров приземного слоя воздуха, измеряемых на метеостанциях. Необходимы дальнейшие исследования по верификации как смоделированных, так и данных реанализа MERRA2 влажности почвы, путем создания баз данных, измеренных *in situ*, для целей региональных исследований на более крупных масштабах.

Работа выполнена при поддержке базового проекта FWES-2024-0023.

Список литературы:

- Агроклиматические ресурсы Красноярского края и Тувинской АССР. КУГ, 1973. 212 с.
- Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.
- Докучаев В.В. Учение о зонах природы. М.: ОГИЗ Географгиз, 1948. 32 с.
- Зубенок Л.И. Испарение на континентах. Ленинград: Гидрометеиздат, 1976. 264 с.
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 226 с.
- Фомин В.В., Иванова Н.С., Залесов С.В., Попов А.С., Михайлович А.П. Лесные типологии в Российской Федерации // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 9–30. DOI:10.37482/0536-1036-2023-6-9-30

УДК 551.321.84

СНИЖЕНИЕ ЭКВИФИНАЛЬНОСТИ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ПОВЕРХНОСТНОГО БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКОВ КАВКАЗА

Постникова Т.Н.¹, Рыбак О.О.^{1,2,3}, Зеколлари Х.³, Губанов А.С.¹

¹ Институт водных проблем РАН, Москва, Российская Федерация, *tasinidze@gmail.com*

² ФИЦ ССЦ РАН, Сочи, Россия

³ Earth System Science и Department of Geography, Vrije Universiteit Brussel, Брюссель, Бельгия

⁴ Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Представлен поэтапный байесовский подход к ограничению параметров поверхностного баланса массы ледников Центрального Кавказа и снижению эквифинальности. Показано, что использование независимых геометрических и высотных ограничений позволяет выделить физически реалистичные параметры и улучшить воспроизведение наблюдаемой эволюции ледников.

Ключевые слова: гляциологическая модель, баланс массы, Кавказ.

Быстрое отступление ледников является одним из ключевых триггеров опасных явлений в высокогорных районах, включая прорывы ледниковых озер и сели, для прогноза которых в регионе требуется надежный гляциологический прогноз, основанный на моделировании.

Однако модели поверхностного баланса массы (SMB), откалиброванные по среднему изменению высоты поверхности ледников, часто характеризуются сильной эквифинальностью, при которой различные комбинации параметров воспроизводят наблюдаемое среднее значение геодезического баланса массы, но при этом соответствуют принципиально разным климатическим режимам.

В данной работе мы предлагаем трехэтапный подход для последовательного ограничения параметров температурно-индексной модели для ледников Кавказа и выявления физически реалистичных решений в рамках байесовского апостериорного распределения.

На первом этапе проводится байесовская калибровка ключевых параметров SMB методом марковских цепей Монте-Карло с использованием наблюдаемого среднего изменения высоты поверхности (dh/dt) в качестве функции правдоподобия. В результате формируется широкое апостериорное распределение, характеризующееся компенсирующими друг друга значениями параметров для коррекции таяния, температуры и осадков.

На втором этапе апостериорные наборы параметров оцениваются с использованием независимого критерия — способности модели течения ледника GloGEMflow-DD (DD — с учетом динамики моренного материала, Postnikova et al., 2023) воспроизводить наблюдаемую длину ледника. Этот критерий существенно сокращает допустимое пространство параметров, исключая значительную часть решений, удовлетворяющих условию первого этапа, но приводящих к нереалистичной геометрии ледников.

На третьем этапе оставшиеся наборы параметров дополнительно ограничиваются требованием соответствия высотному градиенту dh/dt за период 2000–2019 гг. На этом этапе ключевую роль начинает играть моренный материал: его накопление в зоне абляции снижает таяние и принципиально изменяет продольный профиль dh/dt вдоль линии тока ледника.

Применение данного подхода к ледникам различных речных бассейнов Кавказа показывает, что сочетание вероятностного байесовского вывода с независимыми геометрическими и градиентными ограничениями позволяет эффективно снизить эквифинальность и выделить физически согласованные режимы параметров SMB, релевантные для моделирования эволюции ледников и связанных с ними опасных явлений (рис. 1).

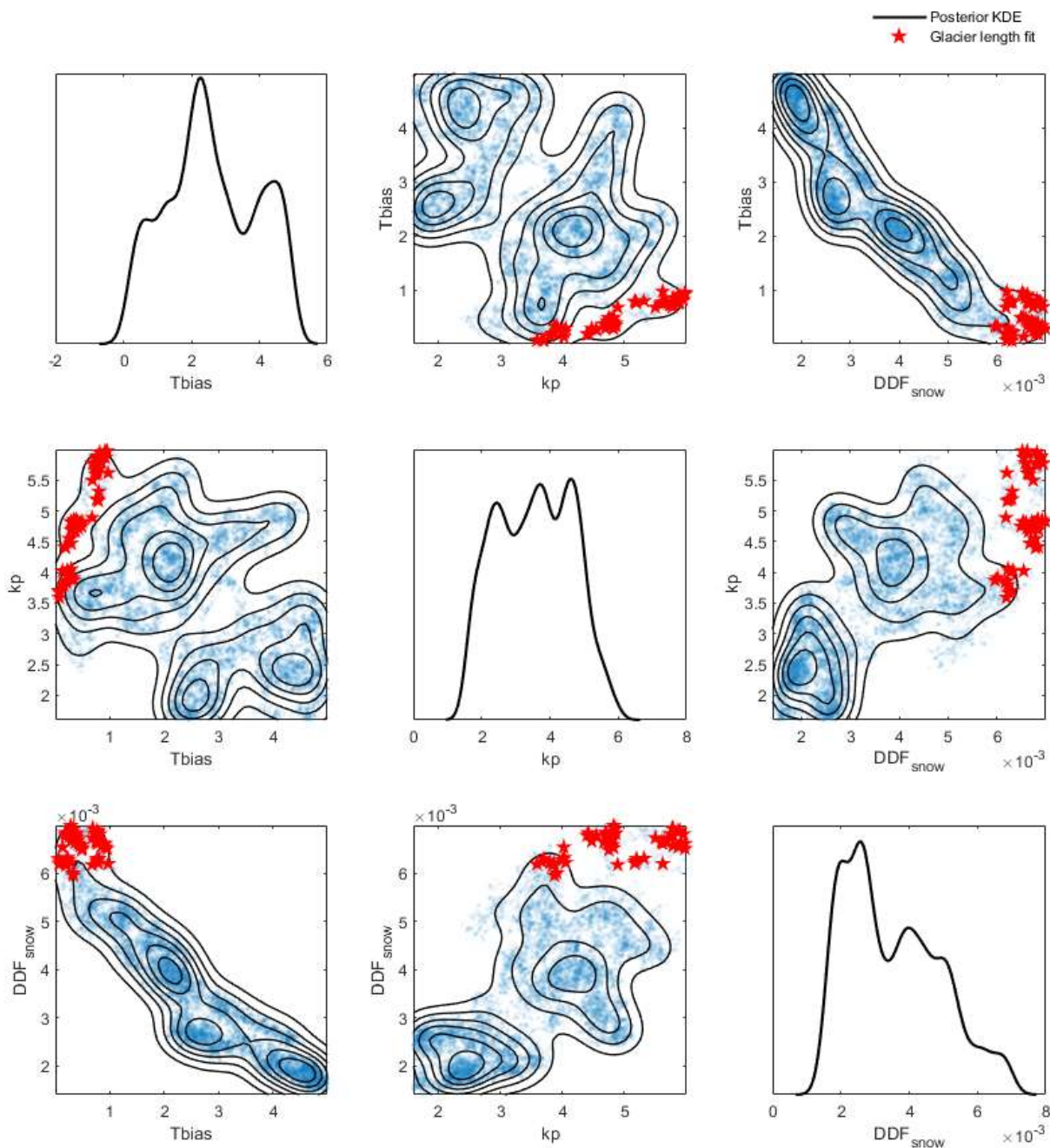


Рис. 1. Апостериорное распределение параметров масс-балансового блока

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-77-10049).

Список литературы:

Postnikova, T., Rybak, O., Gubanov, A., Zekollari, H., Huss, M., Shahgedanova, M. Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciers in the 21st century // *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 11. P. 1256696.

УДК 556.5

ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА МОРЕННО-ПОДПРУДНОГО ОЗЕРА ТАМОЖЕННОЕ (АЛТАЙ)

Пряхина Г.В., Распутина В.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
g.pryahina@spbu.ru

Аннотация. Выполненный с суточным шагом расчет водного баланса для перигляциального озера, расположенного на территории Южно-Чуйского хребта (Центральный Алтай), позволил оценить вклад объемов талых ледниковых вод, таяния снежников и осадков в суммарный приток воды к водоему и выявить особенности поступления талых ледниковых вод в чашу озера. Выявлен преобладающий способ поступления воды в чашу озера подповерхностным путем.

Ключевые слова: водный баланс, водный режим, перигляциальные озера, Южно-Чуйский хребет.

Расчет водного баланса для водных объектов, находящихся в горах, достаточно сложен ввиду недостаточности данных наблюдений и слабой изученности процессов стокоформирования. Это касается как получения инструментальным или расчетным путем данных о величине абляции ледника, так и данных о коэффициентах фильтрации перигляциальных отложений; широкое развитие провальной фильтрации затрудняет определение времени добега ледниковых вод до чаши озера и т.д. Значительные погрешности расчетов водного баланса горных территорий обусловлены объективными трудностями учета метеорологических условий: имеющиеся малочисленные метеостанции расположены в основном в низко- и среднегорьях, что в сочетании со сложным распределением метеорологических характеристик в горах снижает достоверность полученных вертикальных плювиометрических и температурных градиентов. Целью настоящей работы стала оценка составляющих уравнения водного баланса высокогорного моренно-подпрудного озера на основе результатов полевых наблюдений и модельных расчетов.

В качестве объекта исследования выбрано моренно-подпрудное озеро Таможенное (индекс YCh2 по формирующемуся каталогу озер), расположенное в 850 м к северу от ледника Некрасова. Высота уреза воды озера 2768 м, длина озера 360 м, ширина 110 м, площадь водного зеркала на момент проведения батиметрической съемки (2022 г.) составила 25314 м² при соответствующем объеме водной массы 49581 м³. Водосборный бассейн озера площадью 4.98 км² расположен на северном склоне Южно-Чуйского хребта в диапазоне высот от 2770 до 3700 м н.у.м.

Материалами для исследования послужили данные полевых наблюдений, полученные в ходе комплексных экспедиций СПбГУ в 2022 г. (11.07–29.07) и в 2023 г. (11.07–4.08): ряды температуры воздуха, осадков, данные наблюдений за общей и нижней облачностью; данные о суточной величине абляции на леднике; ряды срочных уровней воды, температуры воды, влажности, скорости ветра и расходов воды, результаты наблюдений за приходящей суммарной и отраженной радиацией.

Балансовые расчеты были выполнены на основе измеренных и расчетных значений с суточным шагом, а также в целом за период.

$$\Delta W_{\text{оз}} = W_{\text{п}} - W_{\text{о}} + \eta, \quad (1)$$

где $\Delta W_{\text{оз}}$ - изменение объема воды в озере за некоторый промежуток времени Δt , м³; $W_{\text{п}}$ – приток воды в озеро, м³; $W_{\text{о}}$ – отток воды из озера, м³; η – невязка, м³.

Изменение объема воды в озере ($\Delta W_{\text{оз}}$) рассчитывалось как разница объемов на начало и конец расчетного периода, для определения которых использовалась кривая зависимости объемов от уровней воды, построенная по данным батиметрической съемки 2022 г.

Приток к озеру ($W_{\text{п}}$) рассчитывался по уравнению:

$$W_{\text{п}} = W_{\text{л}} + W_{\text{с}} + W_{\text{ос}} + W_{\text{пл}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{л}}$ - объем притока талой ледниковой воды, м^3 ; $W_{\text{с}}$ - объем притока талой воды снежников и/или сезонного снега, м^3 ; $W_{\text{ос}}$ - объем дождевых осадков, выпавших на поверхность водосбора и озера, м^3 ; $W_{\text{пл}}$ - объем притока талой воды с зоны льда, перекрытого мореной, м^3 .

Объем притока талой воды с ледника определялся по формуле:

$$W_{\text{л}} = A_{\text{ак}} \times 10^{-3} \times S_{\text{ак}} + A_{\text{аб}} \times 10^{-3} \times S_{\text{аб}}, \quad (3)$$

где $A_{\text{ак}}$ - величина суточного таяния в зоне аккумуляции, мм водного эквивалента; $S_{\text{ак}}$ - площадь ледника в зоне аккумуляции, м^2 ; $A_{\text{аб}}$ - величина суточного таяния в зоне абляции, осредненная по всем рейкам методом Kriging в программе ArcMap, мм водного эквивалента; $S_{\text{аб}}$ - площадь ледника в зоне абляции, м^2 .

Расчет таяния льда в зоне аккумуляции $A_{\text{ак}}$ осуществлялся по формуле П. П. Кузьмина (Кузьмин, 1961).

Анализ приходной части уравнения водного баланса показал, что величина среднесуточной абляции ледника в 2022 г. (от 0 до 48 мм) была на 33% ниже, чем в 2023 г. (от 14 до 94 мм). Ожидаемо величина абляции уменьшалась с увеличением высоты, а при приближении к границе “ледник–морена” росла, что связано с большим содержанием каменного материала во льду. Для определения вклада таяния снежников в приходную часть уравнения водного баланса были определены площади снежников на водосборе на каждые расчетные сутки. Сравнительный анализ спутниковых снимков показал, что в исследуемый период площадь снежников на водосборе сократилась с 735900 м^2 (14.07.2023 г.) до 21800 м^2 (31.08.2023 г.).

Величина слоя таяния снежников, согласно расчетам, изменялась от 19 до 96 мм вод. ст. в зависимости от метеоусловий. В дождливые дни (21, 29 и 30 июля 2023 г.) суммы выпавших осадков составили 10, 12.8 и 9.2 мм соответственно. В остальные дни величина суточных сумм осадков была менее 4 мм, что сопоставимо с величиной испарения и поэтому незначительно отразилось на росте уровня воды в оз. Таможенное.

Анализ расходной части уравнения водного баланса показал внутрисуточную вариативность значений измеренных расходов воды в вытекающем из озера ручье, обусловленную изменением величины таяния в зависимости от погодных условий. Так, в период наблюдений с 10:00 до 16:00 часов фиксировалось снижение расходов воды, а затем их увеличение в соответствии с ходом уровня воды в озере. В зависимости от величины притока талых вод в озеро расход воды изменялся в диапазоне от 0.46 до 1.75 $\text{м}^3/\text{с}$.

Рассчитанные величины суточного слоя испарения с водосбора изменялись от 1 до 2 мм, что в пересчете на суммарный слой за исследуемый период составило 28 мм.

Величина невязки суточного водного баланса изменялась в пределах от -7 до +9 мм, что в целом соответствовало ходу среднесуточной температуры воздуха над ледником. Максимальные по модулю отрицательные суточные невязки, полученные в дни с пониженными температурами воздуха и низкими величинами таяния, связаны, вероятно, с поступлением дополнительного количества воды за счет расходования динамических запасов ледника.

Максимальные по модулю положительные значения невязки свидетельствовали о накоплении талой воды в емкостях перехвата, например, малых водоемах на водосборе, коре таяния и др. Величина суммарной невязки за весь исследуемый период составила +18 мм.

На основе расчетов суточных водных балансов был получен баланс для всего периода наблюдений (табл. 1). Основной вклад в приходную часть баланса оз. Таможенное за период наибольшей абляции внесло таяние ледника и снежников. Непревышение суммарной невязки 10%-го порога допускает неучет трудноопределимых составляющих баланса перигляциальных озер без существенной потери точности, что важно как при моделировании, так и при расчетах на неизученных объектах.

Таблица 1. Составляющие водного баланса озера «Таможенное» за период 13.07-03.08 2023.

Составляющие водного баланса	Таяние льда в зоне абляции	Таяние льда, снега в зоне аккумуляции	Таяние перекрытого мореной льда	Таяние снежников на неледниковой части водосбора	Сумма осадков	Испарение	Отток с учетом аккумуляции в озере	Невязка
Слой, мм	109	129	61	112	35	28	400	18

Примечание: площадь водосбора озера 4.89 км², доля оледенения 26 %.

Список литературы:

Кузьмин П.П. Процессы таяния снежного покрова. Л., Гидрометеиздат, 1961. 344 с.

УДК 556.535

МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ СТОКА РЕК СТЕПНОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНОВ РЕК УРАЛ И ТОБОЛ)

Сивохип Ж.Т.

Институт степи УрО РАН, Оренбург, Россия, *sivohip@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты анализа пространственно-временных закономерностей многолетних колебаний речного стока в бассейнах рр. Урал и Тобол (в пределах степной зоны). Климатообусловленные изменения водности рек подтверждаются синфазностью колебаний стока большинства рек исследуемых бассейнов. Выделено 5 фаз изменения стока в исследуемом бассейне за 1930–2024 гг., характеризующихся разной продолжительностью и интенсивностью.

Ключевые слова: степная зона, речной сток, синфазные колебания, фазы водности.

Многолетние колебания речного стока обусловлены действием природных и антропогенных факторов. Из природных ведущая роль принадлежит климатическим параметрам (атмосферному увлажнению и температуре воздуха), а также физико-географическим особенностям водосборных территорий. Антропогенные факторы влияют на динамику водного режима за счет изъятия или поступления воды, перераспределения и регулирования речного стока. Проблема определения вклада климатических и антропогенных факторов в динамику стока крупных рек заключается в их тесной взаимосвязи, а также воздействием данных факторов на сток не только непосредственно, но и косвенно (Георгиади и др., 2019).

На основании вышесказанного, основная цель текущего исследования заключается в выявлении пространственно-временных закономерностей формирования циклов водности в бассейнах рр. Урал и Тобол (в пределах степной зоны). В качестве исходных данных использованы ряды средних значений расходов воды (Q , м³/с) по 14 гидропостам в пределах исследуемых бассейнов (табл. 1). Выбор постов определялся в первую очередь продолжительностью рядов непрерывных наблюдений, позволяющей выявлять фазы различной водности. Сформированная база данных охватывает многолетний период с 1930 по 2024 г. включительно. Для рр. Урал (Кизильское, Оренбург, Кушум), Сакмара (Тат. Каргала) и Тобол (Костанай) временной ряд составляет более 90 лет. Сток верхнего течения рр. Урал, Илек и Тобол зарегулирован водохранилищами многолетнего регулирования.

Для анализа пространственно-временных закономерностей многолетних колебаний годового стока существенное значение имеет выделение группировок лет пониженной и повышенной водности, характеризующихся разной продолжительностью. Для многолетних колебаний речного стока отсутствует устойчивая периодичность – каждый новый цикл не повторяет полностью предыдущего цикла (Закономерности гидрологических процессов..., 2012). Так, для фактических и восстановленных среднегодовых расходов в бассейне р. Урал продолжительность значимых циклов варьирует (1913–2014 годы) от 4.9 лет до 11.3 и 14.6 лет (Магрицкий и др., 2018).

Для большинства рек исследуемых бассейнов, вне зависимости от площади водосборной территории и пространственной дифференциации физико-географических условий, характерны синфазные колебания речного стока (рис. 1).

В первую очередь, совпадение фаз водности свойственно циклическим колебаниям годового стока, реже синфазность отмечается в колебаниях стока половодья и межени (Кузин, 1978). Продолжительность многоводных периодов изменяется от 8 до 10 лет, а маловодных – от 6 до 20 лет. В многоводные годы сток рек исследуемых бассейнов превышает средние многолетние значения в 3–5 раз, а в маловодные – снижается до 0.6–0.15 от среднемноголетних значений. Асинхронность стока наблюдается в отдельные годы, но это не оказывает принципиального влияния на общие закономерности многолетних колебаний.

Таблица 1. Сведения об основных гидропостах в бассейнах рр. Урал и Тобол (в пределах степной зоны).

№ п/п	Река – створ	Период	Площадь водосбора, км ²	Q, м ³ /с	C _v
1	Урал – Кизильское	1938-2023	17200	27.5	0.71
2	Урал – Оренбург	1930-2024	82300	92.9	0.72
3	Урал – Кушум	1930-2023	190000	281.9	0.57
4	Сакмара – Тат. Каргала	1930-2024	29600	130.5	0.45
5	Салмыш – Буланово	1950-2024	2580	8.0	0.41
6	Бол. Кизил – В. Абдряшево	1950-2023	1830	4.6	0.56
7	Бол. Кумак – Новоорск	1967-2024	7250	10.9	0.77
8	Орь – Истемес	1950-2024	13000	6.2	0.78
9	Жарлы – Адамовка	1950-2024	2490	3.8	0.89
10	Илек – Веселый	1950-2023	17200	21.6	0.59
11	Тобол – Костанай	1932-2023	28000	11.0	1.21
12	Тобол – Звериноголовское	1952-2023	143000	34.4	0.78
13	Тобол – Курган	1941-2023	198000	44.3	0.90
14	Уй – Степное	1938-2023	3600	5.0	0.60

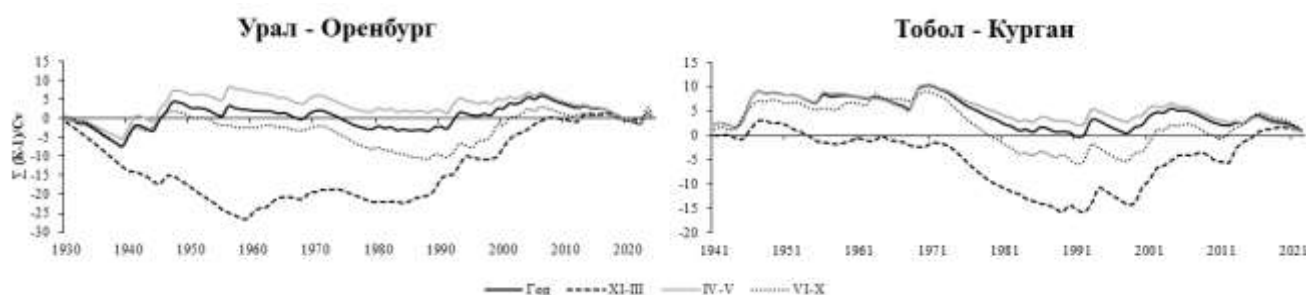


Рис. 1. Нормированные разностные интегральные кривые стока рр. Урал (1930–2024 гг.) и Тобол (1941–2023 гг.)

Асинхронный характер изменения стока проявляется как в периодах смены фаз, так и внутри продолжительного периода (преимущественно группировки маловодных лет).

На основе расчета модульных коэффициентов стока выделены фазы низкой и высокой водности, что позволило установить пространственно-временные особенности многолетних колебаний речного стока в бассейнах рек Урал и Тобол в пределах степной зоны.

Период 1930–1940 гг. характеризуется преобладанием экстремально маловодных лет: Оренбург – $K_i=0.47$; Костанай – 0.54; Кушум – 0.64; Каргала – 0.65. Начиная с 1940-х гг. и вплоть до 1950 г. выделяется фаза высокого стока - общая для большинства рек восточного и юго-восточного секторов Восточно-Европейской равнины и сопредельных территорий. Так, значения стока в пределах исследуемых бассейнов изменялись от 1.77 в г. Курган до 1.68 в г. Оренбург и 1.65 - в г. Костанай.

Продолжительная фаза снижения стока охватывает период с 1950-х до конца 1980-х годов (Оренбург – $K_i=0.91$; Кушум – 0.94; Костанай – 0.85; Звериноголовское – 0.78), в пределах которой выделяются многоводные годы (1957, 1964, 1970). По сравнению с маловодной фазой 30-х годов, для данной фазы характерно преобладание значений $K_i>0.7-0.8$. Асинфазные колебания годового стока зафиксированы для р. Сакмара в створе Тат. Каргала – $K_i=1.01$.

В итоге, можно утверждать, что многоводная фаза 1940-х годов разделила длительный 60-летний период на две фазы пониженного стока, отличающиеся продолжительностью и

интенсивностью (1930–1940 и 1950–1989 гг.). Кроме того, в маловодный период 1950–1989 гг. для отдельных рек исследуемых бассейнов наблюдается асинхронность фаз водности годового и сезонного стока. В частности, значения $K_i > 1$ зафиксированы для стока зимней (Урал – Кизильское, Оренбург и Кушум; Сакмара – Тат. Каргала; Большой Ик) и летне-осенней межени (Урал – Верхнеуральск; Сакмара – Тат. Каргала).

Фаза высокого стока, начавшаяся в 1990-е гг., продлилась до второй половины 2000-х гг. (Оренбург, Звериноголовское – $K_i = 1.46$; Костанай – 1.30; Кушум – 1.22; Тат. Каргала – 1.42), с асинхронными колебаниями стока в отдельные годы. Многоводная, для большинства рек степной зоны в пределах исследуемых бассейнов, фаза совпадает с общей тенденцией увеличения водности, характерной для рек ЕТР, обусловленной увеличением объемов циклонических осадков атлантического происхождения (Водные ресурсы..., 2008). Для многих рек в течении данной фазы зафиксированы абсолютные максимумы расходов воды за весь период наблюдений (1991, 1994).

Начиная со второй половины 2000-х годов происходит общее снижение годовых значений стока: Оренбург – $K_i = 0.74$; Костанай – 0.65; Кушум – 0.71; Степное – 0.86; Тат. Каргала – 0.92. Современная фаза сокращения стока (2008–2023 гг.) для рек верхнего участка бассейнов рек Урал (Урал – Кизильское, Большой Кизил, Большой Ик) и Тобол (Костанай, Звериноголовское) характеризуется повышенными значениями модульных коэффициентов в отдельные сезоны года. Прежде всего, обращают внимание высокие значения стока летне-осенней межени – 1.07 (Большой Ик); 1.16 (Большой Кизил); 1.18 (Урал – Кизильское); рост значений последних обусловлен прохождением экстремального дождевого паводка в августе 2013 г. Например, в данный период $Q_{ср}$ в створе Кизильское (Урал) составил $438 \text{ м}^3/\text{с}$ (при норме $17.9 \text{ м}^3/\text{с}$). Текущая фаза низкой водности для отдельных рек (в первую очередь р. Урал) характеризуется повышенными значениями модульных коэффициентов стока зимней межени – от 1.23 (Верхнеуральск) до 1.35 (Оренбург, Кушум) и 1.68 (Кизильское), что подтверждает установленные ранее тенденции увеличения доли стока данного периода (Сивохип и др., 2021). Также обращает внимание, более «затяжной» характер маловодной фазы в бассейне р. Урал (до 2024 года) по сравнению со степными реками бассейна р. Тобол.

Выводы. Климатообусловленные изменения водности рек подтверждаются синфазностью колебаний стока большинства рек бассейна р. Урал. На основе анализа значений модульных коэффициентов выделено 5 фаз изменения стока за 1930–2024 гг., характеризующихся разной продолжительностью и интенсивностью. Очевидно, что смена фаз водности связана с изменениями макромасштабной атмосферной циркуляции, влияющих на объемы годовых сумм атмосферных осадков и их сезонное распределение. Установлено, что группировки лет низкой водности отличаются большей продолжительностью и могут прерываться годами высокой водности (как правило, 2–3 года). Асинхронный характер колебаний стока в отдельные годы маловодной фазы обусловлен высокими объемами весеннего половодья (1957, 1964, 1970, 1981, 2024) и прохождением экстремального дождевого паводка (2013, 2020, 2024).

Статья подготовлена в рамках выполнения государственной темы ИС УрО РАН «Геоэкологические основы и технологические аспекты оптимизации природопользования в степных регионах России и сопредельных территорий».

Список литературы:

Водные ресурсы России и их использование / Под ред. проф. И. А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 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 // Доклады академии наук. 2019. Т. 488. № 5. С. 539–544.

Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н. И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. 736 с.

Кузин П.С. Циклические колебания стока рек Северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 178 с.

Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М., Торопов П.А., Кенжебаева А.Ж., Ермакова А.Ж. Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 1. С. 90–101.

Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М., Падалко Ю.А. Изменение минимального стока в бассейне реки Урал // Известия РАН. Серия Географическая. 2021. № 6. С. 900–913.

УДК 556.16

МУЛЬТИВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ

Волчек А.А., Сидак С.В., Парфомук С.И., Коляда Ю.П.

Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь,
harchik-sveta@mail.ru

Аннотация. В работе представлен анализ тенденций изменения максимальных расходов воды в период весеннего половодья на реках Беларуси. Исследование охватывает 70-летний период (1948–2017 гг.) и базируется на данных 40 гидрологических постов рек Беларуси. Реализован мультिवременной подход, охватывающий ряды различной продолжительности (начиная с 10-летних периодов), что позволило выявить как краткосрочные, так и долгосрочные тенденции изменения максимальных расходов воды весеннего половодья рек Беларуси.

Ключевые слова: кластеры водосборов, максимальные расходы воды, мультिवременной анализ, тенденция, тест Манна Кендалла, тест наклона Сена, тренд

В условиях глобальных климатических изменений одной из ключевых задач современной гидрологии становится выявление и анализ трендов в многолетних рядах гидрологических наблюдений с учетом нестационарности гидрологических процессов (Волчек и др., 2020). Решение данной задачи обладает как теоретической, так и практической значимостью. С теоретической точки зрения, исследование долговременных тенденций позволяет оценить масштаб и характер воздействия глобального изменения климата на водные ресурсы, выявить закономерности трансформации гидрологического режима водных объектов, углубить понимание взаимосвязей между климатическими факторами и гидрологическими процессами. При этом обнаруживается существенная неравномерность в доступности данных: климатические изменения достаточно отчетливо проявляются в рядах температуры воздуха, тогда как их отражение в динамике атмосферных осадков и, особенно, речного стока носит значительно более сложный и неоднозначный характер. Это создает серьезные методологические вызовы для исследователей, требующие разработки и адаптации специализированных аналитических инструментов. Практическая значимость изучения гидрологических трендов обусловлена необходимостью формирования надежной научной базы для долгосрочных гидрологических прогнозов, разработки эффективных стратегий управления водными ресурсами на региональном и глобальном уровнях, обеспечения устойчивого водопользования в условиях возрастающей климатической неопределенности, минимизации рисков, связанных с экстремальными гидрологическими явлениями (паводки, засухи и др.). Таким образом, проблема обнаружения и интерпретации трендов в гидрологических рядах представляет собой задачу, лежащую на стыке климатологии, гидрологии и прикладной статистики. Ее решение имеет принципиальное значение для обеспечения водной безопасности и устойчивого развития в эпоху климатических изменений.

Одним из наиболее широко используемых методов для обнаружения линейного тренда в гидрологической практике является линейная регрессия. Для анализа динамики исследуемой гидрологической характеристики и выявления тенденции в ее изменении строят уравнение тренда

$$Y(t) = b + \mu t, \quad (1)$$

где $Y(t)$ – смоделированное значение гидрологической характеристики в t -ый момент времени; t – порядковый номер члена ряда данных исследуемой гидрологической характеристики; b и μ – регрессионные коэффициенты.

Чувствительность оценок трендов напрямую зависит от выбранного статистического метода, периода исследования. Традиционно в гидрологических исследованиях Беларуси и стран ближнего зарубежья параметры трендов оценивают применением метода наименьших квадратов (МНК). Однако Всемирной метеорологической организацией в качестве надежного метода для оценки тенденций рекомендуется использование теста Манна-Кендалла (для проверки значимости тренда) и метод наклона Сена (для оценки величины тренда) (Chandler, Scott, 2011). Применение теста Манна-Кендалла не требует специальной формы для функции распределения данных, он устойчив к воздействию экстремальных значений (Mann, 1945). Метод наклона Сена более устойчив к выбросам, чем параметрические тесты, такие как линейная регрессия с оценкой параметров по МНК, так как параметры тренда в случае применения метода Сена рассчитываются на основе стандартизированных данных (Sen, 1968). Также следует отметить, что наличие автокорреляции не влияет на оценочную величину наклона Сена.

Стоит отметить, что применение разных подходов в ряде стран затрудняет выявление глобальных закономерностей. Таким образом, внедрение единых методологических подходов в оценке гидрометеорологических временных рядов, включая построение линейных трендов, является необходимым условием для получения объективных и сопоставимых данных на трансграничных реках. Это позволит повысить достоверность научных выводов и эффективность международных усилий по адаптации к антропогенным и климатическим изменениям.

В работе (Сидак, 2023) сформулированы четыре критерия для оценки качества построения трендов с использованием вышеупомянутых методов. Проведенный сравнительный анализ продемонстрировал, что при моделировании линейных трендов для временных рядов максимальных расходов воды в период весеннего половодья на реках Беларуси наиболее высокую точность обеспечивают статистический тест Манна-Кендалла и метод наклона Сена. В связи с этим в рамках настоящего исследования данные методики выбраны в качестве основных инструментов для выявления и оценки мультивременных тенденций динамики водных расходов.

В силу того, что результаты анализа трендов могут варьироваться в зависимости от периода исследования, важен анализ изменений и динамики стока на различных временных интервалах. Поэтому в данной работе решается задача компактного визуального представления изменений динамики расходов воды по 40 гидрологическим постам Беларуси за произвольный период в рамках 70-летнего временного интервала (1948–2017 гг.) и интерпретация полученных результатов.

Исследование выполнено в пять этапов:

1. В рамках первого этапа исследования проведена стандартизация данных о расходах воды – значения нормированы путем деления на среднеемноголетнее значение для обеспечения сопоставимости данных и корректности анализа.

2. На втором этапе исследования выполнен кластерный анализ стандартизированных временных рядов с применением иерархического агломеративного метода Уорда (Wrzesinski, Sobkowiak, 2018). В результате ряды классифицированы на кластеры, характеризующиеся сходной динамикой изменчивости расходов воды за многолетний период. Оптимальное количество классов выбрано на основе анализа геометрии дендрограммы, построенной для исследуемых рядов.

3. На третьем этапе вычислены средние значения стандартизированных величин расходов воды для водосборов каждого кластера за каждый год.

4. На четвертом этапе исследования для осредненных рядов по каждому кластеру (полученных на третьем этапе) проведена оценка статистической значимости тренда и параметра μ линейной модели (1) с применением теста Манна-Кендалла и метода наклона Сена.

5. На заключительном (пятом) этапе выполнена визуализация полученных на четвертом этапе результатов по каждому кластеру.

Анализ проведен для всевозможных комбинаций периодов, начало которых варьируется в диапазоне 1948–2008 гг., а год окончания – в диапазоне 1957–2017 гг. Таким образом, выполнен мультивременный анализ, охватывающий ряды различной длины, начиная с 10-летнего. Количество рядов, анализируемых по каждому кластеру, составило 1891.

В результате применения кластерного анализа для рядов максимальных расходов воды весеннего половодья выделены четыре кластерные группы (рис. 1). Анализ пространственного распределения кластеров (рис. 2) показал, что в 1 кластер попали гидропосты, расположенные в бассейне Западного Буга и бассейне Ясельды, 2 кластер – гидропосты, расположенные в центральной части бассейна Припяти (на территории Беларуси) и бассейне Немана, а также гидропост р. Ошмянка-д. Большие Яцыны, 3 кластер – гидропосты, расположенные в бассейнах Березины, Днепра, Вилии и Западной Двины, 4 кластер – гидропосты, расположенные в бассейне Сожа.

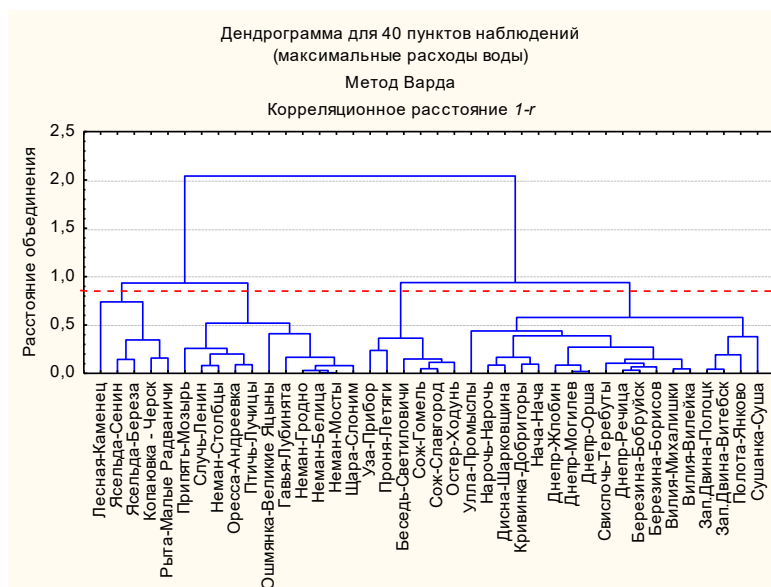


Рис. 1. Дендрограмма результатов кластерного анализа для максимальных расходов воды весеннего половодья



Рис. 2. Пространственное распределение водосборов на основе кластерного анализа максимальных расходов воды весеннего половодья

Результаты мультивременных тенденций изменения максимальных расходов воды весеннего половодья (рис. 3) демонстрируют сходство в динамике изменения рассматриваемой гидрологической характеристики для всех кластеров, что свидетельствует о синхронности изменения тенденций данного вида стока по территории Беларуси. Значимые отрицательные тренды характерны для динамики изменения рядов максимальных расходов воды весеннего половодья различной продолжительности за периоды, начало которых приходится на 1947–1970 гг. Положительные тенденции (в большинстве случаев незначимые) наблюдались в периоды, начавшиеся с 1949 по 1964 гг., с 1970 по 1980 гг. с продолжительностью рядов 18–26 лет, 10–20 лет соответственно. Несмотря на то, что в многолетнем аспекте тенденции в изменении данного вида стока отрицательные, стоит выделить область, присутствующую во всех четырех кластерах, соответствующую тенденциям изменения максимальных расходов воды за периоды, начало которых соответствует 1987–2005 гг., с продолжительностью 10–28 лет. Этим периодам характерны незначимые положительные тенденции изменения стока, ослабевающие после 2005 г.

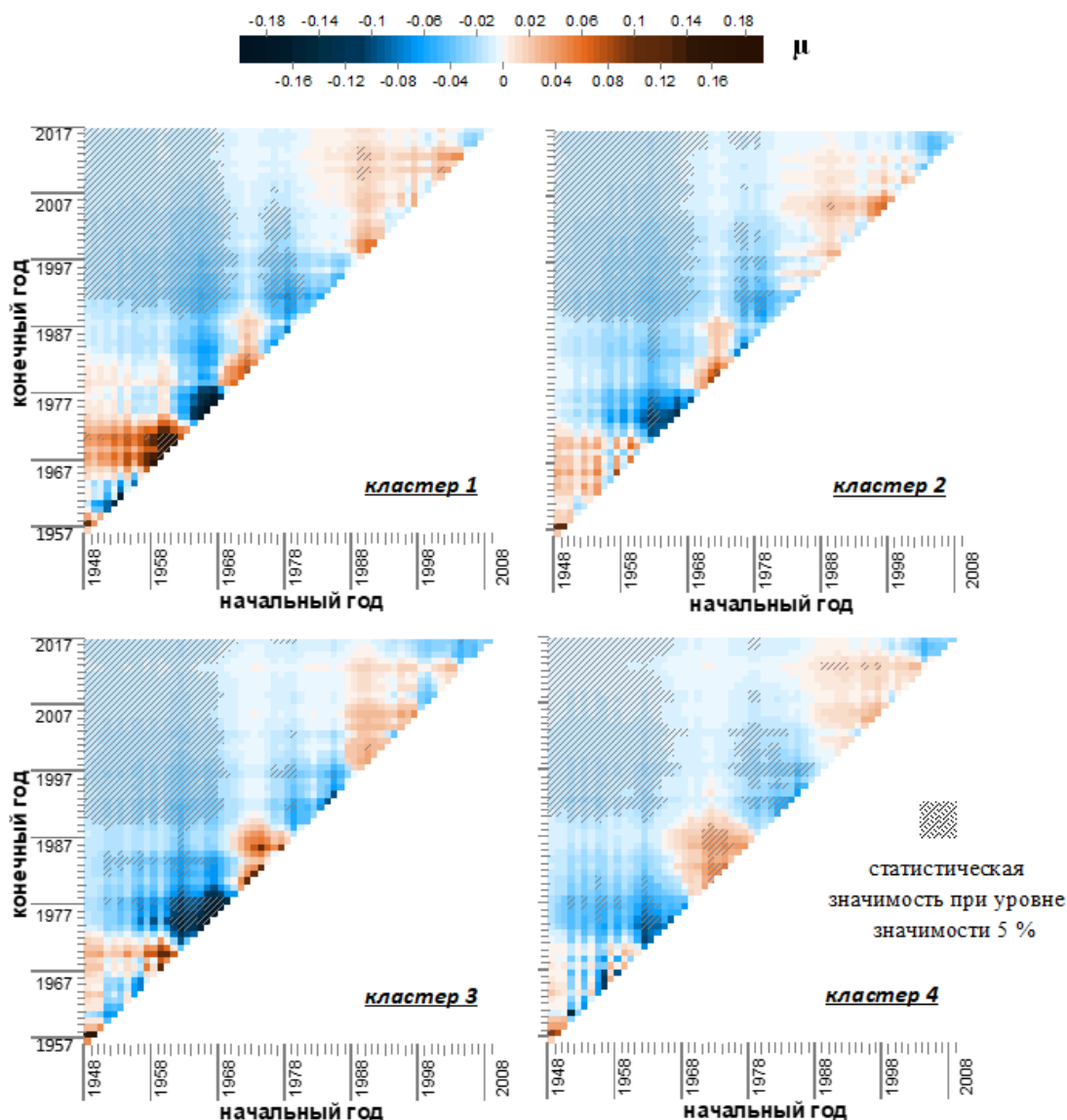


Рис. 3. Мультивременной анализ тенденций изменения максимальных расходов воды весеннего половодья (μ – параметр из формулы (1))

Список литературы:

- Волчек А.А., Волчек Ан.А., Сидак С.В. Оценка современных изменений максимального стока рек Беларуси // Географія. 2020. № 4. С. 26–33.
- Сидак С.В. Методика оценки характеристик стока рек Беларуси в современных условиях // Географія. 2023. № 4. С. 37–43.
- Chandler R.E., Scott M.E. Statistical methods for trend detection and analysis in the environmental analysis // Chichester: John Wiley and Sons, 2011. 368 p.
- Mann H.B. Non-parametric tests against trend // Econometrica. 1945. Vol. 13. P. 245–259.
- Sen P.K. On a class of aligned rank order tests in two-way layouts // The annals of mathematical statistics. 1968. Vol. 39. P. 1115–1124.
- Wrzesinski D., Sobkowiak L. Detection of changes in flow regime of rivers in Poland // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2018. Vol. 66 (1). P. 55–64.

УДК 556.552

ВОДНЫЙ РЕЖИМ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Шайдулина А.А., Китаев А.Б., Петраш М.А., Фасахов М.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
adelinash89@mail.ru

Аннотация. Выполнена оценка динамики водного режима Камского водохранилища по материалам ежедневных наблюдений за притоком и сбросом воды за период с 1956 по 2024 гг. Установлено, что за 69 лет в 62% случаев наблюдалось превышение годового притока над сбросом, в 19% случаев приток и сброс были равны друг другу, и в 19% годовой приток был меньше сброса воды. Средний годовой приток за весь рассмотренный период составил 55.8 км³. Самым многоводным являлся 2019 г., когда в Камское водохранилище поступило 78.5 км³, а маловодным – 2023 г., когда поступило 36.6 км³ воды.

Ключевые слова: водохранилище, водный режим, приток, сброс, водный баланс.

Введение. На р. Каме в XX в. было создано три крупных водохранилища: Камское, Воткинское и Нижнекамское, представляющие собой искусственные водоемы руслового типа, и обеспечивающие приток воды и хозяйственную деятельность на водосборах водохранилищ средней и нижней Волги. Вопросами изучения водного баланса и его отдельных характеристик с целью управления водными ресурсами на Европейской территории России в XX в. и в условиях изменившегося климата и формирования стока в последние десятилетия, занимались многие авторы. К последним работам относятся исследования Г. Х. Исмайловой и Н. В. Муращенковой (2015), где дана оценка изменения и взаимосвязи элементов водного баланса р. Волги. А. С. Литвиновым и А. В. Законновой (2016) рассмотрены многолетние изменения воднобалансовых характеристик Рыбинского водохранилища, а С. В. Борщ с соавторами (2022) указывают на важность прогнозирования притока воды в Цимлянское водохранилище. Существует достаточно много работ, посвященных водохранилищам Камского каскада (Китаев, 2016; Китаев, Шайдулина, 2020; Калинин и др., 2025), поскольку изучение изменчивости характеристик их водного режима не теряет своей актуальности.

Материалы и методы. Камское водохранилище с напором 21.0 м является регулятором каскада. Гидроузел расположен в г. Перми ниже впадения р. Чусовой. Подпор от плотины при нормальном подпорном уровне (НПУ) распространяется вверх по р. Каме на 300 км. Площадь водосбора в створе Камской ГЭС составляет 168000 км² (Правила..., 2014).

Исходными данными для анализа многолетней и внутригодовой изменчивости водного режима Камского водохранилища послужили материалы ежедневных наблюдений за притоком воды в него и сбросом через ГЭС за 1956–2024 гг. Для выполнения расчетов данные были структурированы по водохозяйственным годам, внутри которых выделялись фазы весеннего наполнения, летне-осенней стабилизации и зимней сработки. Конкретные сроки и протяженность каждого периода внутри рассмотренных 69 лет выделялись индивидуально по ежедневным среднесуточным данным об уровне режиме.

Результаты и их обсуждение. Средний годовой приток воды в Камское водохранилище за весь рассмотренный период составил 55.8 км³, а сброс – 54.7 км³. Самым многоводным являлся 2019 г., когда в Камское водохранилище поступило 78.5 км³, а маловодным – 2023 г., когда поступило 36.6 км³ воды (рис. 1). Выполнен расчет отношения притока к сбросу (П/С) в водоем, который позволяет судить о обмене вод. Установлено, что за 69 лет в 62% случаев наблюдалось превышение годового притока над сбросом, в 19% случаев приток и сброс были равны друг другу, и в 19% годовой приток был меньше сброса воды. Таким образом, почти всегда к началу периода наполнения в водохранилище сохранялся некоторый запас воды с предыдущего года. Анализ поступления и сброса воды по фазам работы ГЭС показал (рис. 2), что больше всего воды в водохранилище поступает в периоды

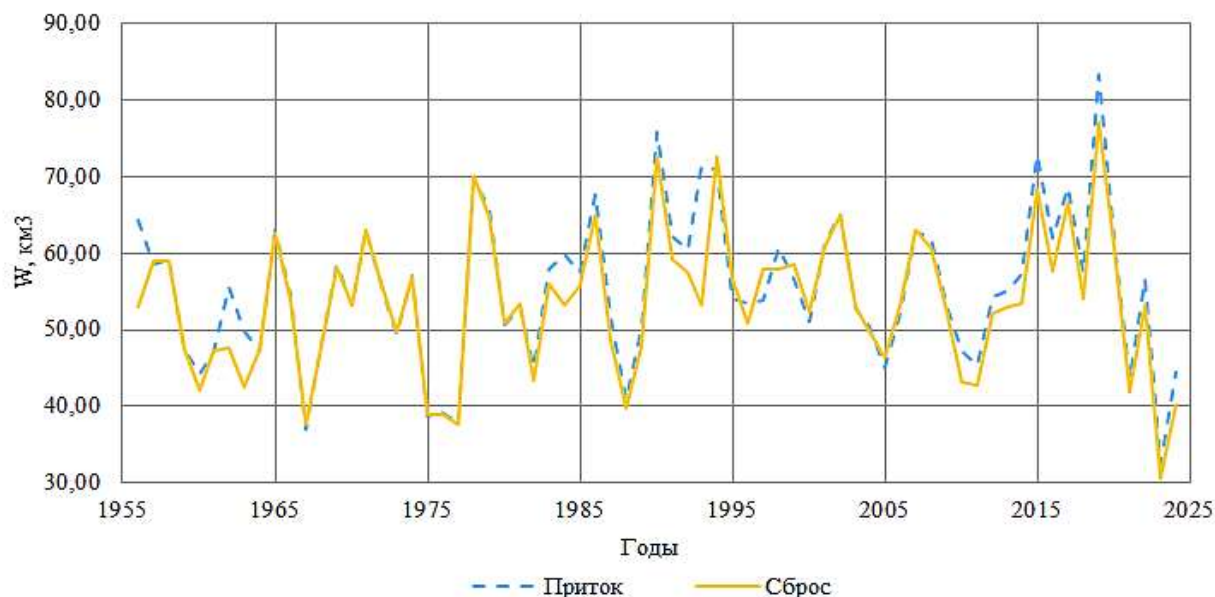


Рис. 1. Объемы притока и сброса воды из Камского водохранилища за период 1956–2024 гг.

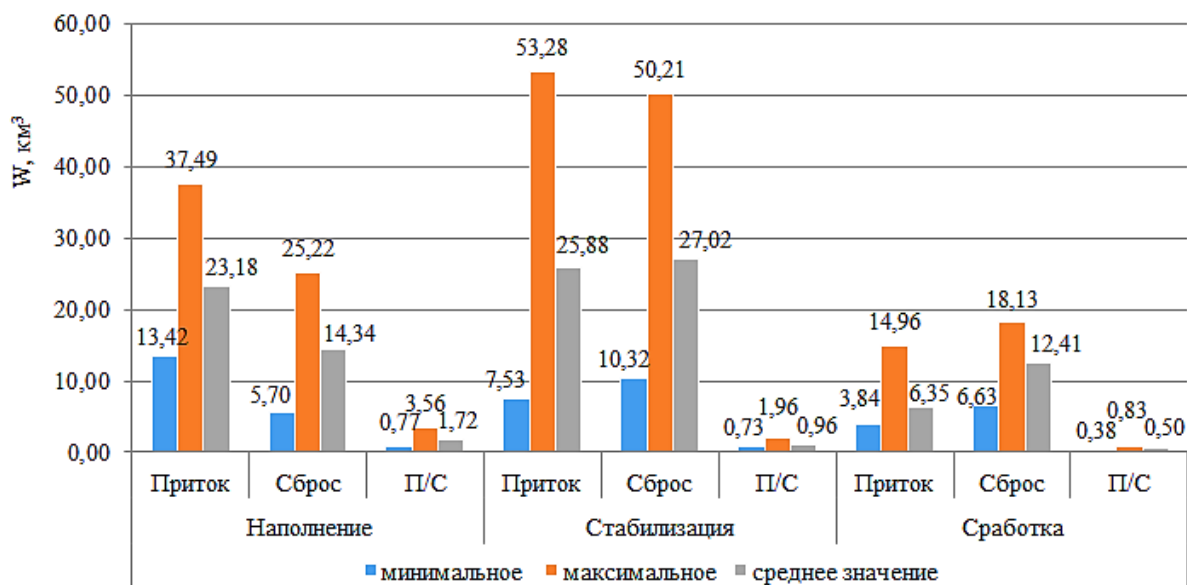


Рис. 2. Объемы притока и сброса воды из Камского водохранилища, а также отношение притока к сбросу (П/С) в фазы весеннего наполнения, летне-осенней стабилизации и зимней сработки за период 1956–2024 гг.

весеннего наполнения и летне-осенней стабилизации: в среднем 23.18 и 24.88 км³. При этом значения сброса значительно отличаются.

Заключение. Таким образом, согласно классификации М. И. Львовича, по источникам питания (Комлев, 2002) реки Пермского края относятся к водотокам с преимущественно снеговым питанием, в период снеготаяния проходит порядка 60–70% годового стока, часть которого аккумулирует Камское водохранилище для использования в последующие месяцы, а часть сбрасывает ниже по течению для функционирования всего Камского каскада, поэтому отношение П/С в среднем составляет 1.72. В период летне-осенней стабилизации накопление воды происходит достаточно редко, и отношение П/С в среднем составляет 0.96. Совершенно

противоположная ситуация характерна для периода зимней сработки, где отношение П/С в среднем составляет 0.50.

Список литературы:

Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 47–63.

Исмаилов Г.Х., Муращенкова Н.В. Оценка изменения и взаимосвязь элементов водного баланса реки Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 5. С. 4–17.

Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Фасахов М.А., Микова К.Д., Ясинский С.В., Скороход А.С. Особенности формирования водного режима водохранилищ камского каскада // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2025. № 2. С. 80–92.

Китаев А.Б. Водный баланс Камского водохранилища в многолетнем аспекте // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: мат. IV Всероссийской научно-прак. конф. с междунар. участием. Челябинск: «Край Ра». 2016. С. 51–55.

Китаев А.Б., Шайдулина А.А. Особенности составляющих водного баланса и уровня режима // Гидрологический режим Камского водохранилища (по материалам XX и начала XXI столетия). Пермь, 2020. С. 336–347.

Комлев А.М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока. Пермь:Изд. ПГУ, 2002. 163 с.

Литвинов А.С., Законнова А.В. Многолетние изменения воднобалансовых характеристик Рыбинского водохранилища // Гидролого-гидрохимические исследования водоемов бассейна Волги: труды ИБВВ РАН. Ярославль: Филигрань, 2016. Вып. 75 (78). С. 23–29.

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

556.555 (470+571)

УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ РАЗНОТИПНЫХ ОЗЕР РАЗЛИЧНЫХ ЛАНДШАФТНО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЗОН РОССИИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Головань Е.В., Мякишева Н.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, *davydenko091@gmail.com*

Аннотация. Рассмотрена структура уровенных колебаний озер, расположенных в различных физико-географических зонах. Показано, что, не смотря на ландшафтно-географические различия, структура уровенных колебаний озер принципиально не меняется – ритмика годовой цикличности проявляется на фоне долгопериодного (инерционного) колебания.

Ключевые слова: озера Ладожское, Онежское, Ильмень, Сартлан, Яркуль, Телецкое, Аргаяш, уровни воды, разномасштабная изменчивость.

При сравнительном изучении озер, расположенных в различных физико-географических зонах, наиболее показательными являются коэффициенты внешнего водообмена, основанные на решении уравнения водного баланса, рассчитанного за время t или при его равновесном состоянии (Богословский, Филь, 1984, Догановский, 1994; Мякишева, 2009; Головань, 2024).

Известно, что внешний водообмен и уровенный режим озер тесно связаны между собой и формируются под воздействием активных (климатических) и адаптивных (подстилающая поверхность) факторов в условиях существующей антропогенной нагрузки. В работах (Мякишева, 2001, 2025) оценена доля участия в формировании водообмена климатических факторов и факторов подстилающей поверхности. Так, для озер зоны избыточного и достаточного увлажнения в пределах Северо-запада Российской Федерации и сопредельных территорий, вклад климатических факторов в общую дисперсию процесса водообмена через расчет индекса CL составляет 32,7%, а вклад подстилающей поверхности через расчет морфометрического индекса внешнего водообмена MM , достигает 56,4%, при вкладе неучтенных факторов 10,9%. При этом для характеристики интенсивности внешнего водообмена озер применялся коэффициент $K_{B, np}$, рассчитанный по притоку с учетом многолетнего модуля стока, отнесенного к центру тяжести озерной системы, индекс CL рассчитывался с учетом средних многолетних значений температуры воздуха (T °C) и атмосферных осадков (P мм), также отнесенных к центрам тяжести озерных водосборов, а индекс MM учитывал такие характеристики озерных систем, как площадь водосбора ($F_{вдсб}$), объем озера ($W_{оз}$), коэффициент удельного водосбора ($K = F_{вдсб} / W_{оз}$), показатель формы котловины ($CI = H_{ср} / H_{макс}$), высота озера над уровнем моря ($H_{абс}$).

Значение коэффициента корреляции между индексом CL и $K_{B, np}$, оцененным для 230 рассмотренных озерных систем составило 0,23, а между индексом MM и коэффициентом $K_{B, np}$, достигло 0,70.

Физико-географические зоны в пределах указанной выше территории выделены с учетом индексов увлажненности озерных бассейнов, рассчитанных в условиях дефицита исходной информации и неопределенности расстановки приоритетов оценивании, соответствующая шкала районирования приведена в работе (Мякишева, Хованов, 2011).

Вероятностный анализ временных рядов средних месячных уровней озер с применением методов теории случайных процессов позволил детализировать полученные ранее выводы.

В качестве исходной информации в настоящей работе использованы ряды средних месячных высот уровней озер, расположенных на Северо-западе Российской Федерации в пределах зоны избыточного и достаточного увлажнения, включая Ладожское и Онежское озера, озеро Ильмень, озера Арктической зоны, расположенные на Кольском полуострове

(озеро Умбозеро) и на полуострове Таймыр (озеро Хантайское и озеро Таймыр); озера Западной Сибири с недостаточным увлажнением (Сартлан и Яркуль); Телецкое озеро – самый большой водоем Горного Алтая; озеро Аргаяш, занимающее особое положение на Зауральской равнине, которая служит естественным переходом между горными массивами Урала и обширными просторами Западно-Сибирской низменности.

Отрезки реализаций средних месячных значений уровней воды анализируемых озер приведены на рис. 1–7.

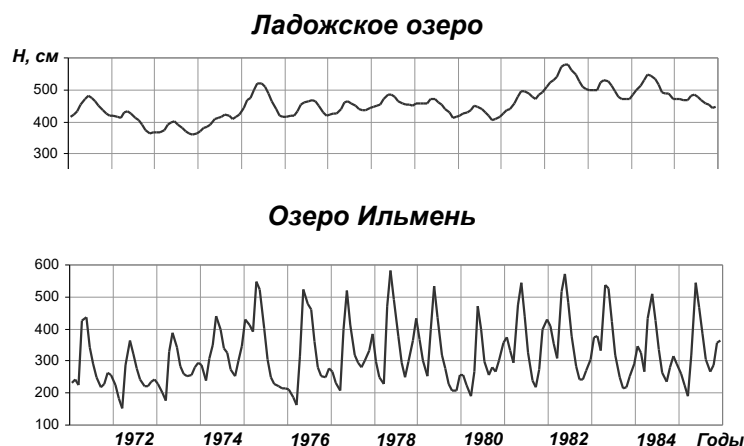


Рис. 1. Средние месячные уровни озер разных классов водообмена

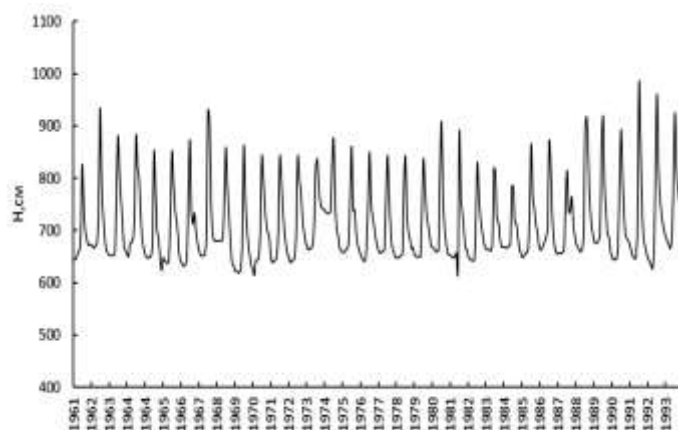


Рис. 2. Ход внутригодовых колебаний уровня оз. Хантайское с 1961–1994 гг.

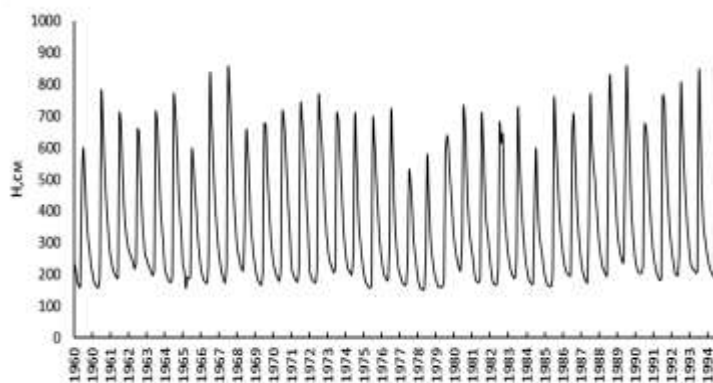


Рис. 3. Ход внутригодовых колебаний уровня оз. Таймыр с 1961–1994 гг.

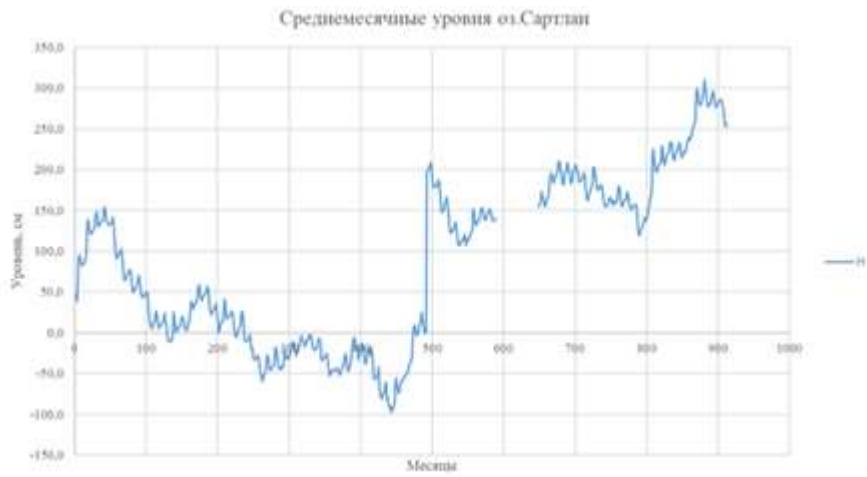


Рис. 4. Хронологический график среднемесячных уровней воды оз. Сартлан – д. Кармакла

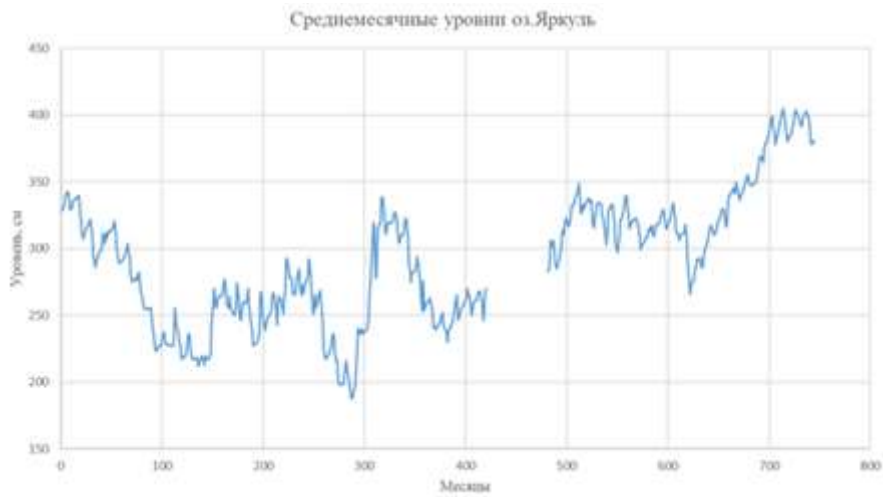


Рис. 5. Хронологический график среднемесячных уровней воды оз. Яркуль – с. Яркуль

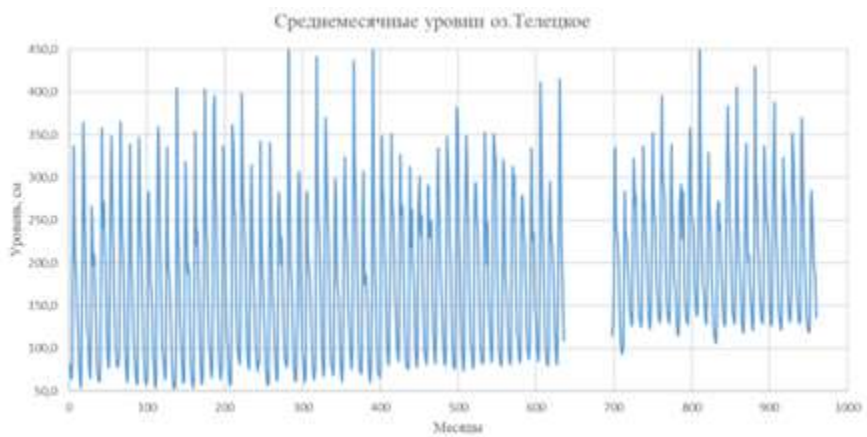


Рис. 6. Хронологический график среднемесячных уровней воды оз. Телецкое – пос. Яйлю

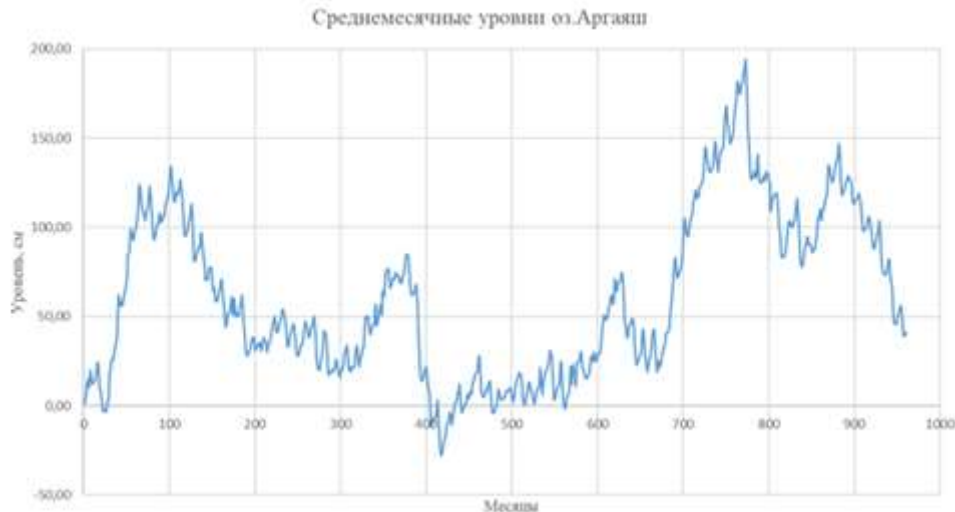


Рис. 7. Хронологический график среднемесячных уровней воды оз. Аргаяш – пгт. Аргаяш

Колебания уровней воды в озерах целесообразно рассматривать как случайный процесс, представляющий собой сумму двух составляющих – сезонной и инерционной, что позволяют записать априорную модель временной изменчивости процесса в следующем виде:

$$\zeta(t) = \eta(t) + \xi(t) = \eta(t) + f(t)\mu(t), \quad (1)$$

где $\eta(t)$ – низкочастотная (инерционная) составляющая; $\zeta(t) = f(t)\mu(t)$ – составляющая сезонной изменчивости; $\mu(t)$ – математическое ожидание внутригодового хода; $f(t)$ – модулирующая функция.

Составляющая $\mu(t)$ – медленно меняющийся случайный процесс с масштабами изменчивости больше одного года. Составляющая $\xi(t)$ – центрированный периодически коррелированный случайный процесс с периодом коррелированности T , равном 1 году.

Для разных озер временная изменчивость описывается частными разновидностями модели (1). Так, для озер с преобладанием в межгодовой изменчивости амплитудной модуляции внутригодового хода уровня модель (1) примет вид:

$$\zeta(t) = f(t)\mu(t).$$

К таким озерам можно отнести Хантайское, Таймыр, Телецкое – озера, расположенные в холодном климате Арктической зоны и в горах Алтая.

Для озер с преобладанием инерционного колебания уровня озера модель (1) преобразуется в выражение:

$$\zeta(t) = \eta(t) + \mu(t).$$

К таким озерам можно отнести Сартлан, Яркуль, Аргаяш.

Для озера Ильмень модель (1) останется неизменной, поскольку межгодовые колебания уровня проявляются как в виде модуляции внутригодового хода, так и в виде наложения долгопериодной составляющей.

Характер внутригодовых и межгодовых колебаний уровня воды в озерах существенно зависит от физико-географических особенностей региона. Время наступления максимальных и минимальных значений внутри года определяется климатическими факторами -

соотношением тепла и влаги. Особенности подстилающей поверхности влияют на преобразование климатического сигнала, формируя инерционную составляющую временной изменчивости. Это хорошо видно при анализе значений параметров авторегрессии первого порядка (АР(1)), описывающих корреляционные зависимости внутригодовой изменчивости гидрометеорологических процессов (табл. 1)

Таблица 1. Значения параметров авторегрессии внутригодовых колебаний осадков, расхода и уровней воды

Река – пост	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>	<i>VIII</i>	<i>IX</i>	<i>X</i>	<i>XI</i>	<i>XII</i>
м/с Старая Русса (осадки)	0.03	0.29	0.03	-0.05	0.27	-0.11	0.19	-0.09	-0.10	0.16	-0.02	0.11
р. Мста –д. Девкино	0.57	0.86	-0.08	0.27	0.43	0.35	0.71	0.74	0.82	0.65	0.55	0.70
р. Ловать –г. Холм	0.35	0.68	-0.33	0.35	0.55	0.44	0.69	0.60	0.77	0.73	0.67	0.61
р. Шелонь –д. Заполье	0.33	0.66	-0.24	0.29	0.43	0.53	0.42	0.57	0.76	0.79	0.66	0.53
р. Волхов –г. Новгород	0.92	0.83	0.71	0.52	0.86	0.87	0.83	0.83	0.92	0.91	0.95	0.80
оз.Ильмень –д. Войцы	0.84	0.84	0.58	0.26	0.79	0.80	0.86	0.85	0.83	0.86	0.85	0.78

Высокая внутригодовая коррелированность (параметр авторегрессии больше 0.6) характерна для месяцев, когда реки (Мста, Ловать, Шелонь) находятся на грунтовом питании. Для р. Волхов характерны значимые коэффициенты корреляции для всех месяцев года, кроме месяца весеннего половодья – апреля. Это связано с регулирующим действием озера Ильмень, для которого также характерны высокие коэффициенты для всех месяцев года, кроме марта и апреля. Следует учитывать и влияние водохранилища Волховской ГЭС на гидрологический режим р. Волхов.

Список литературы:

- Богословский Б.Б., Филь С.А. Классификация водоемов по внешнему водообмену // Географо-гидрологический метод исследования вод суши. М.: Изд-во АН СССР. Геогр. об-во СССР, 1984. С. 54–60.
- Головань Е.В. Закономерности гидрологического режима озер Северо-Запада Российской Федерации в условиях меняющегося климата. – Дис. на соискание учен. степени канд. геогр. наук. СПб. / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный гидрометеорологический университет". 2024. 298 с.
- Догановский А.М. Уровенный режим озер – интегральный показатель динамики их биоценозов. – Дис. на соискание учен. степени д-ра. геогр. наук. СПб, 1994. 348 с.
- Мякишева Н.В. Закономерности формирования внешнего водообмена и уровенного режима озер зоны избыточного и достаточного увлажнения. Автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра. геогр. наук. СПб, 2001. 48 с.
- Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. СПб: РГГМУ, 2009. 159 с.
- Мякишева Н.В. Многокритериальная классификация озер. СПб: РГГМУ, 2025. 206 с.
- Мякишева Н.В., Хованов Н.В. Моделирование индекса увлажненности озерных бассейнов в условиях неопределенности и дефицита исходной информации // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 16. С. 5–12.

СЕКЦИЯ 3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КАЧЕСТВО ВОДЫ РЕК И ВОДОЕМОВ

УДК 504.4.054

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД МУРИНСКОГО РУЧЬЯ (САНКТ-ПЕТЕРБУРГ) ПО ГИДРОХИМИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Акулов Д.А.¹, Андреев Я.С.², Волкова Е.А.¹, Захарова А.М.³, Захарова К.С.⁴,
Козина В.Ю.¹, Маркова М.М.⁵, Милютин А.Д.¹, Михайлина А.М.⁶, Ничипорович А.В.¹,
Орлова Е.Р.⁶, Топилина В.М.⁷, Фомина В.П.⁸, Хозяшева А.В.⁹, Шалунова Е.П.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
st117730@student.spbu.ru;

² Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь;

³ Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия;

⁴ Северный (Арктический) федеральный университет, г. Архангельск, Россия;

⁵ Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва, Россия;

⁶ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия;

⁷ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия;

⁸ МИРЭА - Российский технологический университет, г. Москва, Россия;

⁹ Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. Представлены результаты оценки качества вод Муринского ручья (Санкт-Петербург) по гидрохимическим показателям. Исследования выполнены с использованием полевых и лабораторных методов и расчета индекса качества воды CCME WQI. Выявлены повышенные концентрации ионов азота, дефицит кислорода. Полученные данные подтверждают неблагоприятное экологическое состояние водотока и его влияние на качество вод реки Охты.

Ключевые слова: гидрохимия, Муринский ручей, Санкт-Петербург, WQI

Городские водотоки — важный элемент урбанизированных экосистем, выполняющий функции дренажа, очищения и рекреации, и первым отражающий последствия антропогенного воздействия. В условиях города нагрузка в виде ливневого стока, залповых сбросов и нарушения почвенно-растительного покрова приводит к поступлению различных поллютантов, ухудшая состояние водного объекта. К таким водотокам относится Муринский ручей, на качество воды которого жалуются местные жители, для него фиксировались превышения ПДК и аварийные сбросы в 2024²⁴–2025²⁵ гг. Целью работы является экологическая оценка состояния вод, для ее достижения были выполнены задачи:

- рекогносцировочное обследование и маршрутное наблюдение территории;
- отбор проб воды и их исследование по гидрохимическим показателям в соответствии с ГОСТ 31861–2012 (ГОСТ..., 2012);
- оценка состояния водотока по эколого-гидрохимическим показателям.

Объект и методы. Муринский ручей — малый городской водоток северо-восточной части Санкт-Петербурга, приток реки Охты (бассейн Невы, Балтийское море). Водосбор ручья с 2000-х гг. практически полностью урбанизирован, значительные участки русла имеют

²⁴ СЗМУ Росприроднадзора отреагировало на сообщение о сбросе нефтесодержащей жидкости в Муринский ручей. // Официальный телеграм-канал Северо-Западного Управления Росприроднадзора. Запись от 04.03.2024. [Электронный источник]. URL: https://t.me/rpn_szfo/1700 (дата обращения: 10.10.2025).

²⁵ Инспекторы СЗМУ Росприроднадзора работают на Муринском ручье и на реке Охта. // Официальный телеграм-канал Северо-Западного Управления Росприроднадзора. Запись от 22.10.2025. [Электронный источник]. URL: https://t.me/rpn_szfo/5232 (дата обращения: 23.10.2025).

бетонные берега. Систематический государственный мониторинг отсутствует, имеющиеся данные носят фрагментарный характер (Изотова, 2023; Цветков, Латина, 2023).

Исследования проводились на 11 станциях наблюдения, карта-схема и результаты гидробиологического исследования опубликованы в предыдущей статье, посвященной оценке качества вод Муринского ручья по гидробиологическим показателям (Акулов и др., 2025). В результате рекогносцировочного маршрута и анализа данных дистанционного зондирования на текущий момент выявлены следующие возможные источники загрязнения: Совхоз «Ручьи», садово-парковое представительство «Калининский», гаражный кооператив «Северный», место складирования отходов (предположительно строительных и грунтов), хозяйственно-бытовые стоки и ливневка. На станции 6 была обнаружена труба и замусоренность территории средствами личной гигиены. Также сточная труба находится выше по течению между станциями 9 и 10. В полевых условиях были измерены TDS, pH, электропроводность, ОВП, температура. Лабораторные исследования включали определение общей жесткости, мутности, катионного и анионного состава вод методами титрования, потенциометрическим, фотометрическим (Щебеста, Шалунова, 2008). Погрешность измерения для потенциометрического метода $\pm 15\%$, для фотометрического $\pm 15\text{--}20\%$. Также для оценки состояния водотока был рассчитан CCME WQI – Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index, аналогичные расчеты существуют для реки Охта (Белякова, Зуева, 2021). Расчет проводился по следующим параметрам: Na^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , O_2 . В качестве нормативных значений были приняты значения рыбохозяйственного ПДК для вод в соответствии с приказом Росрыболовства (Приказ..., 2025).

Сравнение с нормативами. Для учета региональных геохимических особенностей полученные значения сравнивались с региональным фоном, указанным в пояснительной записке к сводному тому нормативов допустимого воздействия (НДВ) рек и озер бассейна Финского залива (Нормативы..., 2012) на станциях рек Ленинградской области – Селезневка, Сестра, Сайменский канал, Черная, Каменка. В Муринском ручье наблюдаются повышенные концентрации сульфатов и ионов азота по сравнению с фоновыми.

Для оценки с точки зрения пригодности как зоны отдыха для горожан (т.е. для рекреационных целей) было проведено сравнение показателей с ПДК санитарных правил и норм (СанПиН..., 2021). Превышены ПДК для вод хозяйственно-бытового и культурного назначения по ионам аммония на станциях 9 и 10 (2.26 и $2.76 \text{ мг/дм}^3 > 2 \text{ мг/дм}^3$), расположенных ниже по течению от сточной трубы. Следовательно, состояние водоема неудовлетворительно для рекреации в Муринском парке и на Лыжероллерной трассе (ст. 10).

По сравнению с рыбохозяйственным ПДК (Приказ..., 2025) превышены концентрации аммония (в 3 раза) и нитритов (в 1.4 раза), нарушен норматив по кислороду. Среднее (по всем станциям) содержание кислорода ниже рыбохозяйственных нормативов в 1.5 раза.

Сравнение станций по показателям. В средней части течения наблюдается повышение мутности, цветности и концентраций основных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-) вследствие уменьшения расхода воды, в устье их значения снижаются за счет увеличения расхода и разбавления. Значения pH варьируют от 7 до 7.8 и возрастают от истока к устью. Более низкий pH у истока связан с болотистыми участками парка «Сосновка», где берет начало ручей, что подтверждается обнаружением оксидных пленок железа. На всех станциях отмечается дефицит кислорода относительно рыбохозяйственных нормативов: минимальные концентрации зафиксированы на станциях 9 и 10, максимальная — в устье (ст. 11). Среднее содержание кислорода в Муринском ручье (4.2 мг/л) в 1.5 раза ниже, чем в реках Селезневка и Сестра. Содержание калия изменяется от 3.5 до 8.2 мг/л , натрия — от 30 до 81 мг/л с максимумами при минимальном расходе воды, что может быть связано с ливневыми стоками и противогололедными реагентами. Концентрации сульфатов возрастают от истока к устью, на станции 6, где выявлена сточная труба, они увеличиваются в 2 раза. Доминирование сульфатов среди анионов и натрия среди катионов не характерно для Северо-Западного региона и указывает на антропогенное воздействие.

Особое внимание вызывают биогенные элементы – ионы азота и фосфора. Концентрации нитратов плавно снижаются от истока к устью (от 5.1 до 2.2 мг/л). Наибольшие значения в зоне повышенной рекреационной нагрузки (ст. 3, 6, 9) и рядом с Садово-парковым хозяйством (ст. 3) «Калининский». Можно предположить некоторое поступление со стоками с водосбора, особенно при внесении удобрений при выращивании растений для благоустройства. Концентрации аммония возрастают от истока до станции 10 (западнее пр. Руставели): на станции 6 (в 1.6 раза по сравнению со станцией 3), где обнаружена сточная труба и отмечена замусоренность русла бытовыми отходами; на станции 9 (в 2 раза по сравнению со станцией 6). Источников потенциального загрязнения несколько. На отрезке русла на ст. 6, 9, 11 расположено несколько труб, из которых производится сброс сточных вод (предположительно ливневых). Максимальные концентрации аммония (2.26 и 2.76 мг/л) приурочены к станциям 9 и 10 с минимальным содержанием кислорода (3.6 и 2.6 мг/л). Закономерность обусловлена тем, что при интенсивном поступлении аммония на его нитрификацию тратится кислород, это создает особенно неблагоприятную среду для гидробионтов. Концентрации нитритов стабильны между станциями (0.07–0.12 мг/л), исключение составляет станция 11, где отмечается значительное увеличение в 3 раза до 0.3 мг/л. Нитриты – продукт биохимического окисления аммиака, поэтому увеличение на станции 11 связано с повышением концентраций аммиака выше по течению.

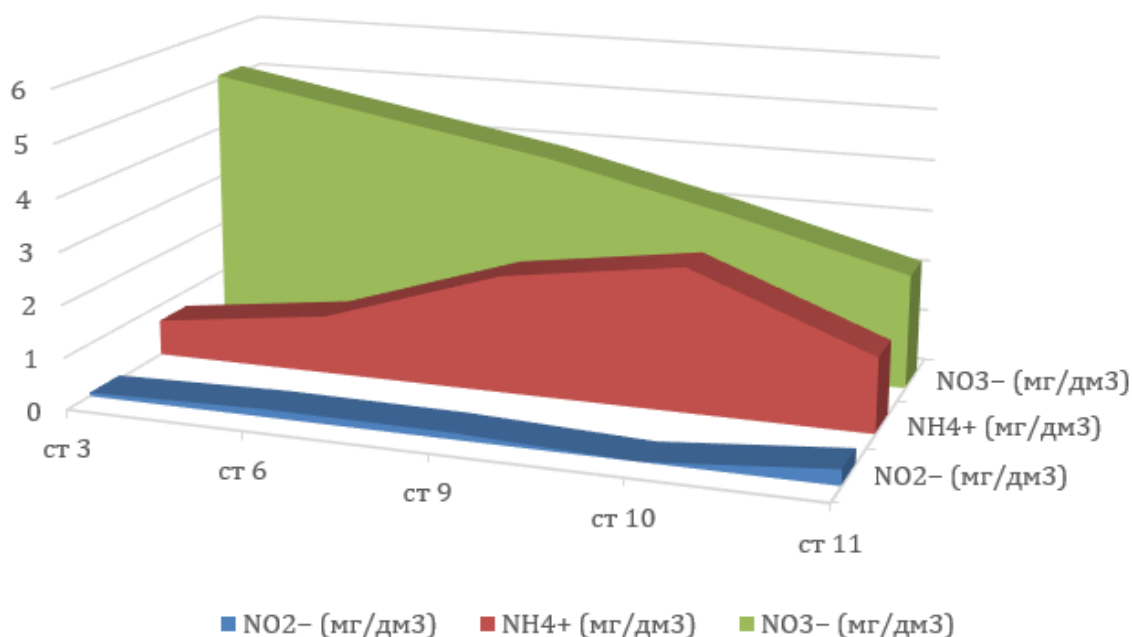


Рис. 1. Пространственная динамика ионов азота от истока к устью

Наибольшая концентрация фосфатов (0.09 мг/л) на станции 10, в точке с максимальным содержанием аммония. Можно предположить единый источник поступления в водоем. По сравнению с реками Селезневка и Сестра (0.047 и 0.061 мг/л) осредненное содержание фосфатов в Муринском ручье (0.05 мг/л) соизмеримо с данными водными объектами.

WQI. Результаты расчета CCME WQI представлены в табл. 1. Плохое состояние воды по CCME WQI отмечено на станциях 9 и 11, на остальных станциях состояние воды удовлетворительное. Наблюдались отклонения от нормы только по трем параметрам: NH_4^+ , NO_2^- , O_2 . Отклонения по NH_4^+ и O_2 наблюдались на всех станциях, отклонения по NO_2^- наблюдались на всех станциях, кроме станций 3 и 10. Самые сильные отклонения NH_4^+ и O_2 (4.5 и 1.3) выявлены на станции 10, самые сильные отклонения NO_2^- (2.8) на станции 11.

Таблица 1. Результаты оценки качества воды с помощью WQI по станциям.

Станция	3	6	9	10	11
WQI	79.21	66.54	62.5	68.22	62.63
Состояние	удовлетвор.	удовлетвор.	плохое	удовлетвор.	плохое

Связь с гидробиологией. Гидробиологические исследования показывают ухудшение качества воды от среднего течения к устью ручья и связь содержания кислорода с видовым разнообразием гидробионтов. На ст. 3, расположенной ближе к истоку, отмечены наибольшие индексы разнообразия зоопланктона и зообентоса при минимальных концентрациях аммония и нитритов и высоком содержании кислорода. На ст. 10 при критически низком содержании кислорода зафиксирован минимальный индекс разнообразия зоопланктона, а в бентосе доминируют устойчивые к анаэробным условиям олигохеты. При этом наихудшие показатели разнообразия бентоса отмечены на ст. 6 и 8, в районах расположения сточных труб (Акулов и др., 2025).

Выводы. Воды Муринского ручья характеризуются повышенными концентрациями соединений азота и устойчивым дефицитом растворенного кислорода в нижнем течении. По гидрохимическим показателям и индексу CCME WQI на ряде станций состояние вод оценивается как неудовлетворительное. Муринский ручей может рассматриваться как один из источников поступления биогенных элементов в р. Охту. Полученные данные могут быть использованы при разработке мероприятий по улучшению экологической ситуации на водосборной территории реки Охта, что особенно важно, т.к. Охта относится к рекам рыбохозяйственного значения.

Список литературы:

ГОСТ 31861–2012. Вода. Общие требования к отбору проб.

Изотова Т.В. К истории формирования Муринского парка в Санкт-Петербурге // XIV Чтения памяти Т. Б. Дубяго. 2023. С. 16–23.

Цветков О.Ю., Латина С.В. Ретроспективный анализ эффективности использования территории г. Мурино Ленинградской области // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2023. № 1. С. 403–407.

Акулов Д.А. и др. Оценка качества вод Муринского ручья (Санкт-Петербург) по гидробиологическим показателям // Экол.-геогр. образование: настоящее и будущее: сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. (10–14.11.2025). Курган, 2025. С. 100–112.

Шебеста А.А., Шалунова Е.П. Полевые экологические исследования подземных вод. СПб: Изд-во СПбГУ, 2008. 46 с.

Белякова А.М., Зуева Н.В. Оценка качества воды городской реки по гидрохимическим индексам (р. Охта) // Тр. Карельского научного центра РАН. 2021. № 9. С. 72–84.

Нормативы допустимого воздействия рек и озер бассейна Финского залива (от границы РФ до северной границы бассейна р. Нева): пояснительная записка. СПб, 2012. С. 63.

СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к безопасности факторов среды обитания.

Приказ Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения...» (зарег. 02.06.2025 № 82497).

УДК 556.114.7556.55

ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД В ПОЧВАХ ВОДОСБОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР – ООПТ ПРЕДКАМЬЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

Александрова А.Б., Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Валиев В.С., Хасанов Р.Р.

Маланин В.В., Марасов А.А., Солодникова О.М.

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Казань, Россия, *adabl@mail.ru*

Аннотация. Проведена оценка запасов и скоростей аккумуляции органического углерода в почвах водосборов и донных отложениях охраняемых озер Предкамья Республики Татарстан. Установлено, что средние запасы органического углерода в почвах (21.1 тС/га) вдвое выше, чем в донных отложениях (10.6 тС/га). При этом скорость современного накопления запасов органического углерода в донных отложениях (0.53 т/(га·год)) на порядок превышает аналогичный показатель для почв (0.0211 т/(га·год))

Ключевые слова: озера, особо охраняемые природные территории, органический углерод, почвы водосборов, донные отложения, Предкамье Республики Татарстан

Особо охраняемые природные территории служат эталонными площадками для фоновой экологической мониторинга, позволяя оценивать ненарушенные уровни накопления веществ, включая углерод (Стишов, Троицкая, 2017). Ключевыми звеньями в долгосрочном депонировании углерода и регуляции биогеохимических циклов являются почвы и донные отложения, что определяет актуальность их изучения в контексте климатических изменений.

Предкамье Республики Татарстан (РТ) характеризуется высокой озерностью и обилием водоемов со статусом ООПТ (Зиганшин и др., 2024). Однако процессы осадконакопления и углеродного цикла в донных отложениях и на водосборах озер региона остаются малоизученными. Имеющиеся данные ограничены исследованиями отчлененных заливов Куйбышевского водохранилища в пределах Саралинского участка Волжско-Камского биосферного заповедника (Зиганшин и др., 2025).

Исследования проводились на 20 озерах, имеющих статус памятников природы регионального значения РТ. Отбор донных отложений (ДО) осуществлялся трубкой ГОИН «ТГ-1» с учетом особенностей рельефа дна озер. Почвенный покров водосборов изучался методом закладки почвенных разрезов зональных почв и отбором проб с почвенных горизонтов. Аналитические исследования включали определение объемного веса и влажности (ГОСТ 5180-2015), гранулометрического состава (ГОСТ 12536-2014), органического вещества (ГОСТ 26213-2021). Для расчета запасов органического углерода использовались средние значения проб ДО и почв водосбора слоя 10 см. Для вычисления доли углерода в общей массе органического вещества (ОВ) использовали коэффициент 0.58 (Аринушкина, 1961).

Донные отложения представлены преимущественно песчанистыми и глинистыми илами, суммарная доля которых составляет 83% (табл. 1).

Таблица 1. Типология донных отложений озер – ООПТ Предкамья РТ.

Тип	Частицы <0.01, мм, %	ППП, %	Доля типов ДО, %
Пески	5	0.7	9
Илистые пески	10	2.7	9
Песчанистые илы	30	8.1	26
Глинистые илы	>30	9.8	57

Преобладание пелитовой фракции (<0.01 мм) в ДО (на 30% выше, чем в почвах) является прямым указанием на аллохтонное происхождение значительной части осадочного

материала за счет смыва с водосборных территорий (табл. 2). Данный вывод подтверждается и значительно большей вариабельностью гранулометрического состава ДО по сравнению с почвами. Средние значения гранулометрического состава ДО и почв схожи, однако вариабельность (максимальные значения) для ДО существенно выше (табл. 2).

Таблица 2. Гранулометрический состав и содержание ОВ в почвах водосборов и ДО озер.

Объект	Гранулометрические фракции, %							ОВ, %
	1-0.25мм	0.25-0.05мм	0.05-0.01 мм	0.01- 0.005мм	0.005- 0.001мм	< 0.001 мм	< 0.01 мм	
ДО	<u>4.0+1.2</u> 0.0-24.5	<u>27.9+4.4</u> 2.7-84.5	<u>29.0+2.5</u> 1.6-51.8	<u>9.8+1.1</u> 0.6-24.4	<u>13.9+1.5</u> 0.6-30.4	<u>16.3+2.0</u> 1.7-41.9	<u>39.9+4.2</u> 1.2-87.0	<u>4.0+0.53</u> 0.2-11.2
Почвы	<u>4.1+0.5</u> 0.4-9.8	<u>36.7+2.7</u> 15.8-16.1	<u>31.5+1.6</u> 12.5-45.9	<u>7.7+0.5</u> 0.8-13.9	<u>9.2+0.5</u> 3.5-14.3	<u>10.8+0.9</u> 0.9-22.3	<u>27.5+1.6</u> 7.0-43.7	<u>3.6+0.2</u> 1.2-5.6

Содержание органического вещества в ДО более вариабельно ($CV=54.8\%$), чем в почвах ($CV=30.2\%$). Запасы органического углерода в почвах водосборов варьировали от 7.0 до 32.0 тС/га (в среднем 21.1 тС/га), в ДО – от 0.5 до 23.3 тС/га (в среднем 10.6 тС/га). Таким образом, пул органического углерода в почвах в 2 раза превышает пул в ДО. Учитывая скорости образования почв и донных отложений (Авакумов, 2011; Иванов, 2018), для Предволжья РТ скорость накопления органического углерода в почвах водосборных территорий озер ООПТ РТ составляет 0.0211 т/га в год, в донных отложениях – 0.53 т/га в год. В озерах скорость накопления органического углерода в 25 раз выше, чем в почвах. Таким образом, почвы функционируют как долговременный резервуар углерода, тогда как донные отложения выступают в роли динамичного накопительного компонента. Аллохтонный вклад почв в формирование донных отложений подтверждается повышенным содержанием пелитовых частиц.

Список литературы:

- Абакумов Е.В. Хронология онтогенеза первичных почв: Обзор проблемы // вестник СПбГУ. Серия 3. 2011. Вып. 3. С. 114–119.
- ГОСТ 12536—2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
- ГОСТ 17.1.5.01-80 Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность.
- ГОСТ 26213— 2021 Почвы. Методы определения органического вещества.
- ГОСТ 5180—2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
- ГОСТ Р 58595—2019 Почвы. Отбор проб.
- Иванов Д.В., Осмелкин Е.В., Зиганшин И.И. Исследование современного и исторического осадконакопления в водоемах Приволжской возвышенности и Низменного Заволжья // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 31–43. DOI:10.17076/lim844
- Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р., Валиев В.С., Александрова А.Б. Осадконакопление и аккумуляция органического углерода в донных отложениях озер – отчлененных заливов Куйбышевского водохранилища // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. №6. С. 70–81. DOI: 10.17076/lim2207
- Зиганшин И.И., Иванов Д.В., Хасанов Р.Р. Динамика озерности Волго-Мешинского междуречья // Российский журнал прикладной экологии. 2024. №3. С. 21–27. DOI:10.24852/2411-7374.2024.3.21.27
- Стишов М.С., Троицкая Н.И. Организация экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях. М.: WWF, 2017. 138 с.

УДК 504.4.054

ОЦЕНКА ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕК С СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ, ПРОМЫШЛЕННОЙ И РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Архипов Е.А.¹, Зотов С.И.¹, Спирин Ю.А.², Платоненко Г.О.¹, Лузина А.Д.¹,
Здобин М.А.¹

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,
egor.arhipov2000@gmail.com

²Институт географии РАН, Москва, Россия.

Аннотация. Проведена оценка химического загрязнения малых рек Калининградской области под влиянием промышленной (р. Граевка), сельскохозяйственной (р. Прохладная) и рекреационной (р. Светлогорка) нагрузок. Установлены превалирующие загрязнители ухудшения качества вод в зависимости от функционального назначения территории: промышленных, рекреационных, сельскохозяйственных земель.

Ключевые слова: реки, антропогенные воздействия, химическое загрязнение, качество вод.

Уникальное географическое положение Калининградской области в бассейне Балтийского моря обуславливает высокую экологическую уязвимость ее водных объектов, подверженных многофакторному антропогенному воздействию (Нагорнова, 2012, Спирин, Зотов, 2023). Наиболее репрезентативными для оценки превалирующих типов хозяйственной нагрузки являются малые реки, аккумулирующие локальное влияние (Рыбкина, 2023).

Целью исследования является выявление особенностей состава и уровня загрязняющих веществ в водах малых рек, обусловленных доминирующим типом антропогенной нагрузки. Сравнительная оценка позволяет установить характерные «профили» загрязнения для каждого вида воздействия и определить их относительный вклад в деградацию качества вод, что составляет научную основу для разработки водоохраных мероприятий в регионе.

В данной работе проводится сравнительный анализ химического загрязнения модельных водотоков, испытывающих различный тип нагрузки: р. Граевка (промышленная территория), р. Светлогорка (рекреационная территория), р. Прохладная (сельскохозяйственная территория)

На каждой реке было выделено по одному пункту мониторинга (далее пункты) в пределах воздействия потенциальных источников негативного воздействия (рис. 1).

Отбор проб вод в исследуемых реках проводился в 2025 году в разные фазы гидрологического цикла. Весенний пробоотбор выполнен во вторую декаду апреля, летний – вторая декада июля и осенний – вторая декада октября.

Пробоотбор осуществлен в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб». Определение гидрохимических показателей проводилось в лаборатории Высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта. Взвешенные вещества определены в соответствии с РД 52.24.468-2019, химическое потребление кислорода (ХПК) – ПНД Ф 14.1:2.4. 190-2003, биологическому потреблению кислорода за 5 суток (БПК₅) – ПНД Ф 14.1:2.3:4.123-97, нитраты – ПНД Ф 14.1:2.4-95, нитриты – ПНД Ф 14.1:2.4.3-95, аммоний и аммонийный азот – ПНД Ф 14.1:2.1-95, фосфаты – ПНД Ф 14.1:2.1-95, сухой остаток – ПНД Ф 14.1:2.4.261-2010, хлориды – ГОСТ 4245-72, сульфаты – ПНД Ф 14.1:2.159-2000, железо – ПНД Ф 14.1:2.159-2000, нефтепродукты – ПНД Ф 14.1:2.4.128-98. Для выполнения анализов использовали двухлучевую спектрофотометрию UV-1800 Shimadzu и систему капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ-105М».

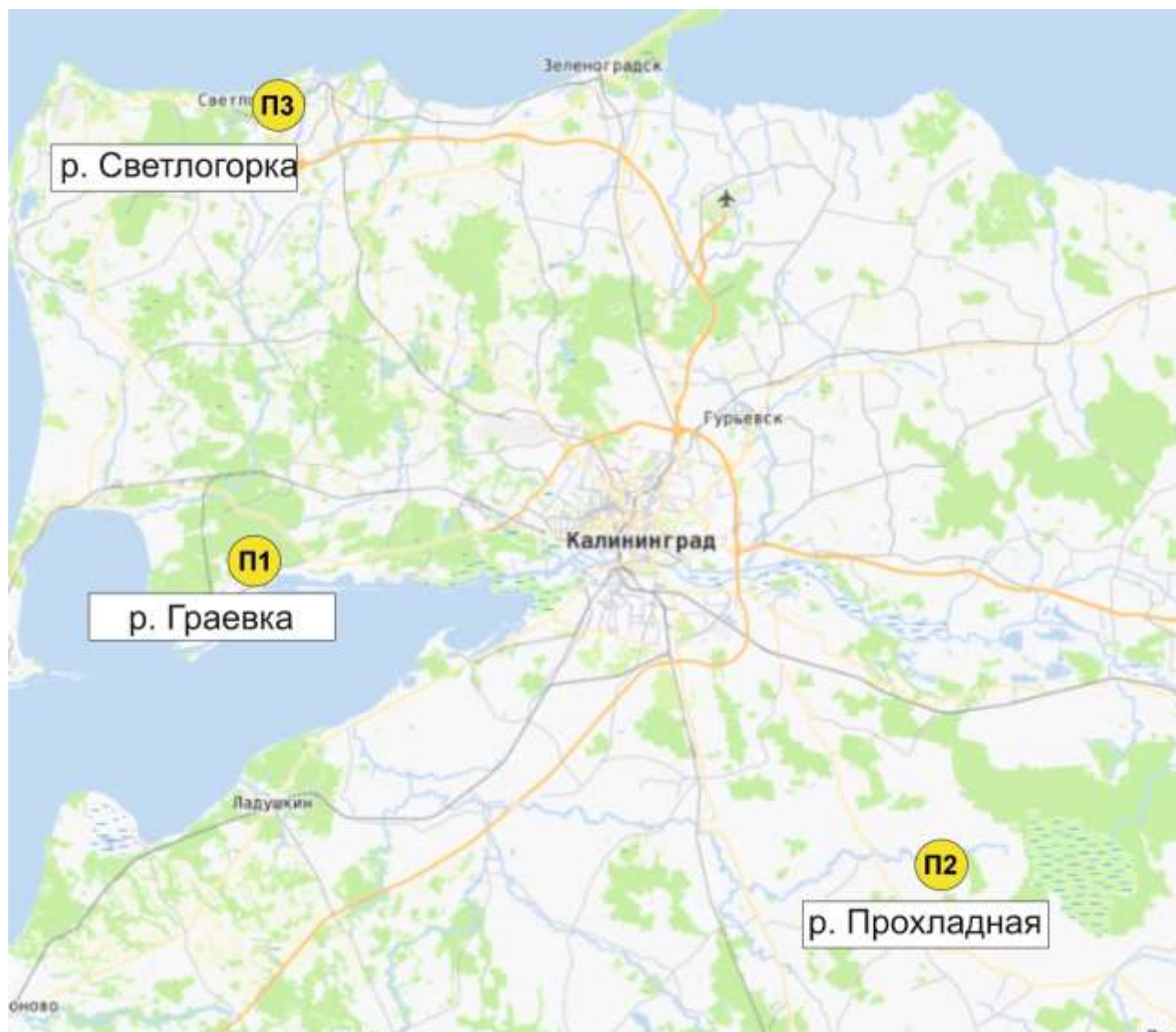


Рис. 1. Схема расположения пунктов мониторинга

Использованы предельно допустимые концентрации (ПДК) согласно Приказу Росрыболовства от 26 мая 2025 года № 296. Для ХПК и сухого остатка приняты хозяйственно-бытовые ПДК в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21.

Анализ гидрохимических данных весеннего периода 2025 года свидетельствует о существенном органическом и биогенном загрязнении водотоков на фоне половодья. Во всех исследуемых водотоках наблюдается устойчивое превышение рыбохозяйственных ПДК по БПК₅, достигающее 5,6 раз в р. Граевке (промышленная территория). Значительные превышения ПДК по фосфат-иону и аммоний-иону зафиксированы в р. Светлогорке (рекреационная территория) и в р. Граевке (промышленная территория) подтверждают антропогенный генезис загрязнения, связанный со стоком с урбанизированных территорий.

Летняя межень приводит к резкому ухудшению качества вод по большинству гидрохимических показателей. Наиболее выраженным становится загрязнение железом общим, концентрации которого в водах р. Граевки (промышленная территория) превышают ПДК на порядки (до 44 раз). Параметры органического загрязнения (БПК₅, ХПК) сохраняются на высоком уровне, особенно в водотоках промышленной и рекреационной территорий. В р. Светлогорке (рекреационная территория) фиксируется пиковое, до 3-кратного, превышение ПДК по ХПК, сопровождаемое значительным ростом концентраций фосфатов, что однозначно связывает это загрязнение с пиковой рекреационной и коммунальной нагрузкой.

Данные осеннего периода подтверждают хронический характер загрязнения водных объектов. Ключевой проблемой становится дефицит растворенного кислорода, содержание которого во всех контрольных точках опускается ниже рыбохозяйственного норматива, достигая минимальных значений в зоне рекреации. Это является прямым следствием сохраняющегося высокого уровня БПК₅ и ХПК. Хотя концентрации железа и аммония несколько снижаются относительно летнего максимума, их превышения над ПДК носят устойчивый характер.

Для визуализации пространственно-временных закономерностей построены графики межсезонной динамики концентраций гидрохимических показателей, вносящих наибольший вклад в снижение качества вод (рис. 2).

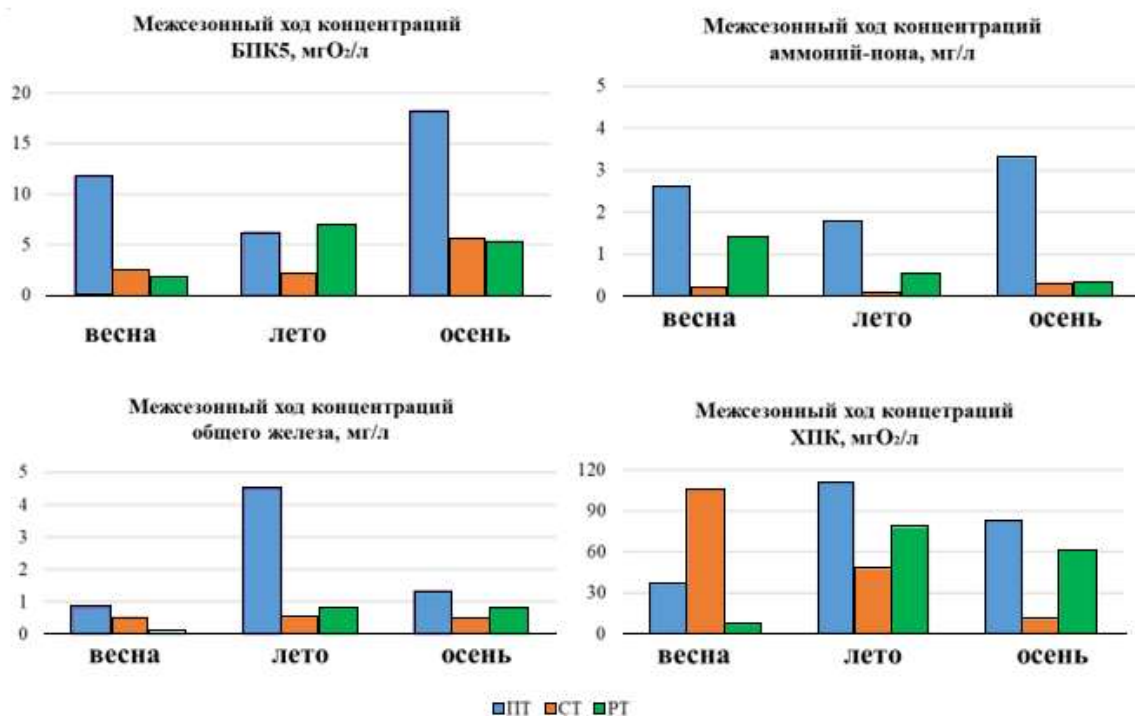


Рис. 2. Межсезонная динамика концентраций по доминирующим загрязнителям р. Граевка (ПТ – промышленная территория); р. Прохладная (СТ – сельскохозяйственная территория); р. Светлогорка (РТ – рекреационная территория)

Анализ динамики БПК₅ демонстрирует сезонную изменчивость органической нагрузки во всех исследуемых водотоках. График динамики по общему железу наглядно показывает его доминирование и экстремальный летний пик в р. Граевке (промышленная территория). Аналогичные графики для аммоний-иона и ХПК указывают на их превалирование и сезонные максимумы в Светлогорке (рекреационная территория). В то время в р. Прохладной (сельскохозяйственная территория) уровни загрязнения по большинству контролируемых показателей остаются минимальными в течение всего года за исключением ХПК в весенний период, что может быть обусловлено поступлением в водоток большого количества органических веществ с заболоченных территорий в половодье.

На основе полученных данных выполнен расчет значений индекса загрязнения вод (ИЗВ), который подтверждает и обобщает выявленные ранее пространственно-временные закономерности химического загрязнения (табл. 1).

Наиболее неблагоприятное состояние характерно для р. Граевки (промышленная территория), воды которой во все сезоны оцениваются как «загрязненные» (IV класс) или «грязные» (V класс), а в летний период достигает категорий «очень грязные» (VI класс) и

Таблица 1. Результаты расчета ИЗВ в исследуемых водотоках.

Сезон	Индекс загрязнения вод		
	р. Граевка (промышленная территория)	р. Прохладная (сельскохозяйственная территория)	р. Светлогорка (рекреационная территория)
	П1	П2	П3
Весна	5.11	1.98	1.08
	Грязные (V)	Умеренно загрязненные (III)	Умеренно загрязненные (III)
Лето	11.05	2.00	3.62
	Чрезвычайно грязные (VII)	Загрязненные (IV)	Загрязненные (IV)
Осень	5.90	1.66	4.12
	Грязные (V)	Умеренно загрязненные (III)	Грязные (V)

«чрезвычайно грязные» (VII класс) с максимальными значениями ИЗВ 8.83 и 11.05 соответственно. р. Светлогорка (рекреационная территория) демонстрирует выраженную сезонную динамику: классы качества вод изменяются от «умеренно загрязненных» (III класс) вод весной до «очень грязных» (VI класс) летом, что связано с пиковой антропогенной нагрузкой в курортный сезон. Р. Прохладная (сельскохозяйственная территория) характеризуется относительно стабильным, более благоприятным состоянием, колеблющимся между III и IV классами качества вод («умеренно загрязненные» и «загрязненные»), что указывает на сравнительно меньшую интегральную химическую нагрузку.

Результаты исследования подтвердили существование четко выраженных профилей химического загрязнения малых рек, обусловленных типом антропогенной нагрузки. Наиболее загрязнены воды р. Граевки (промышленная территория) с доминированием железа, воды р. Светлогорки (рекреационная территория) отличается пиковым загрязнением биогенными элементами в летний сезон, тогда как воды р. Прохладной (сельскохозяйственная территория) демонстрируют значения гидрохимических показателей близких к рыбохозяйственным ПДК. Такая ситуация требует разработки адресных водоохранных мер для каждой категории земель.

Список литературы:

- Нагорнова Н. Н. Геоэкологическая оценка состояния малых водотоков Калининградской области: дис. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2012. С. 8–19.
- Рыбкина И.Д. Оценка антропогенной нагрузки на водные ресурсы и эффективности их использования: обзор методологических подходов // Антропогенная трансформация природной среды. 2023. Т. 9. № 2. С. 55–67. DOI:10.17072/2410-8553-2023-2-55-67
- Спирин Ю. А., Зотов С. И. Водотоки пойм: методы исследований и геоэкологическая оценка. М.: ИНФРА-М, 2023. 217 с. DOI:10.12737/1903343

УДК 556.5:556.114:628.1.03(571.63)

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ГОРОДСКИХ РЕК ВЛАДИВОСТОКА

Болдескул А.Г., Юрченко С.Г., Луценко Т.Н., Шамов В.В., Лупаков С.Ю.

ФГБУН «Тихоокеанский институт географии» ДВО РАН, Владивосток, Россия,

boldeskul@tigdvo.ru

Аннотация. В работе исследуется качество воды рек г. Владивостока с учетом характеристик водосбора и сезонной динамики гидрохимических показателей по данным наблюдений 2023 года. Установлено, что реки, водосборы которых значительно преобразованы в результате урбанизации, отличаются превышениями предельно допустимых концентраций по марганцу, аммонии, нитритам и фосфатам, наиболее выраженными в меженный осенне-зимний период. Полученные данные подтверждают доминирующее влияние городской застройки на формирование качества вод и свидетельствуют о необходимости организации эффективного гидрохимического мониторинга городских рек.

Ключевые слова: Приморский край, малые городские реки, биогенные соединения, тяжелые металлы, загрязнение.

В продолжение исследований геоэкологического состояния рек Владивостокского городского округа, начатые в 2022 г. (Шамов и др., 2025), в настоящей работе представлены результаты систематических гидрохимических наблюдений в 2023 г., охватывающих основные фазы гидрологического режима – зимнюю межень, весеннее половодье, летний паводок, осеннюю межень. Отбор проб проводился в верховьях и низовьях шести ключевых водотоков – рек Объяснения, Первой Речки, Второй Речки, Седанки, Черной Речки и Богатой, водосборы которых находятся в различной степени антропогенного преобразования (рис. 1).

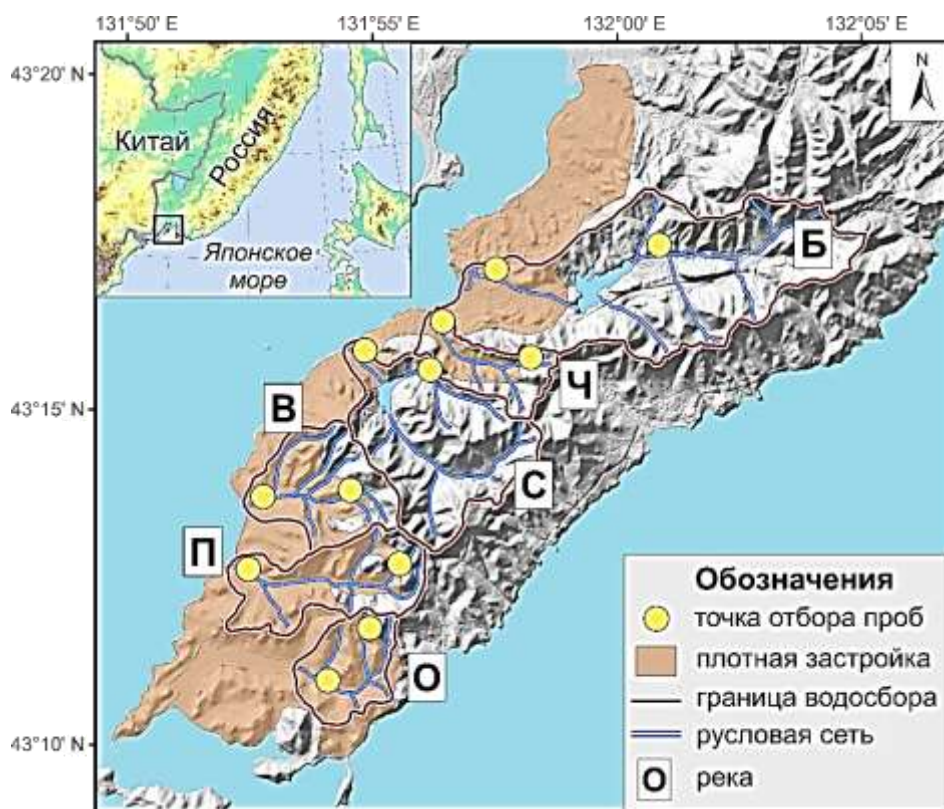


Рис. 1. Схема района исследования с местами отбора проб: О – р. Объяснения, П – р. Первая Речка, В – р. Вторая Речка, С – р. Седанка, Ч – р. Черная, Б – р. Богатая

К староосвоенным урбанизированным отнесены водосборы рр. Объяснения, Первой Речки и Второй Речки. Остальные водосборы отличаются средней степенью антропогенного преобразования. В верховьях изученных рек, как правило, ландшафты близки к естественным.

Химический анализ проб воды проводился в ЦКП «Центр ландшафтной диагностики и ГИС ТИГ ДВО РАН» согласно стандартным методикам гидрохимического анализа (Шамов и др., 2025). Полученные данные позволили проследить сезонную динамику концентраций растворенных веществ, включая биогенные элементы (нитраты, нитриты, аммонийный азот, фосфаты, $C_{орг.}$ и металлы (Cu, Zn, Mn, Fe, Pb, Cd), в зависимости от стока и интенсивности урбанизации водосбора. Устойчивая межень в феврале и ноябре 2023 г. позволила оценить уровни загрязнения при минимальном стоке. Во время дождевого паводка (август) возможен двойственный эффект: интенсивные осадки приводят к смыву загрязняющих веществ с урбанизированных территорий и одновременно способствуют их разбавлению.

Анализ гидрохимических показателей воды рек в верховьях показал низкий уровень загрязнения и соответствие нормативным требованиям для рыбохозяйственных водоемов (Приказ Росрыболовства от 26.05.2025 № 296). Содержание аммонийного азота ($N - NH_4^+$) варьировалось в пределах от 0.05 мг/л до 0.25 мг/л, что не превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) (0.4 мгN/л). Концентрация $P_{мин}$ находилась в диапазоне 0.003–0.014 мг/л, $P_{общ}$ – 0.008–0.017 мг/л. Указанные показатели укладываются в допустимые нормы для чистых вод (вод I класса) – 0.02 мгP/л и 0.05 мгP/л, соответственно (ГОСТ Р 59025-2020). Уровень pH колебался от 6.5 до 8.2, оставаясь в пределах нормативного диапазона. Отклонением стало умеренное повышение содержания $C_{орг.}$, который варьировал от 0.8 до 4.7 мг/л; максимальных значений показатель достигал в августе в рр. Седанка и Богатая. Вероятно, это связано с естественными процессами: сезонным развитием водной растительности и поступлением органических веществ в реки с водосбора во время паводков. $N - NO_3^-$ фиксировался на уровне 0.2–4.8 мг/л, $N - NO_2^-$ – ниже предела обнаружения в 0.03 мг/л. Содержание железа варьировало от 2.4 до 12.8 мкг/л, при этом максимальные концентрации наблюдались также в августе. Концентрация марганца находилась на уровне 0.8–14.2 мкг/л и соответствовала природному фону для региона (Шулькин и др., 2007). Концентрации Zn варьировали в диапазоне 0.3–4.8 мкг/л. Содержание Cu, Ni, Cd и Pb фиксировалось значительно ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Антропогенное воздействие на исследуемые участки минимально, а качество воды соответствует установленным требованиям. Таким образом, геоэкологическое состояние верховьев рек можно оценить как благополучное.

Для оценки химического загрязнения низовьев малых рек Владивостока использована балльная шкала по девяти ключевым показателям: $N - NH_4^+$, $N - NO_2^-$, $N - NO_3^-$, $P_{мин}$, $C_{орг.}$ и такие металлы как Fe, Mn, Zn и Cu (табл. 1). За основу также приняты ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Концентрации Ni находились в диапазоне 0.1–3.2 мг/л, Cd – 0–0.2 мг/л, Pb – 0.1–4.0 мг/л. Уровень pH колебался от 6.1 до 7.8, оставаясь в пределах нормативного диапазона. Все значения были существенно ниже ПДК, поэтому данные элементы не включались в расчет суммарного загрязнения. В ходе наблюдений установлено, что концентрации $C_{орг.}$ изменялись от 1.3 до 7.0 мг/л. Пик концентраций приходился на август и коррелировал с увеличением стока; при этом показатели оставались в пределах природных фоновых уровней (Луценко и др., 2013). Каждому показателю присваивался балл от 1 до 5 в зависимости от кратности превышения ПДК: 1 – в пределах нормы; 2 – от 1 до $2 \times$ ПДК; 3 – от 2 до $5 \times$ ПДК; 4 – от 5 до $10 \times$ ПДК; 5 – свыше $10 \times$ ПДК. Показатели, по которым данные отсутствовали («–»), не учитывались в расчете. Суммарный балл по всем оцененным показателям характеризует общую степень загрязнения: 9 – низкое (в пределах нормы); 10–14 – умеренное; 15–19 – высокое; 20–24 – очень высокое. Предложенная методика основана на общепринятых принципах комплексной оценки качества воды (Зубарев, 2014; Anastasopoulos et al., 2025). Она адаптирует существующие подходы к мониторингу городских рек с учетом доступности данных и потребностей конкретного населенного пункта, что позволяет выявлять пространственные и сезонные изменения.

Таблица 1. Балльная оценка степени химического загрязнения рек г. Владивостока по результатам сезонного гидрохимического мониторинга 2023 г.

Месяц	Река	N – NH ₄ ⁺	P _{мин}	N – NO ₂ ⁻	N – NO ₃ ⁻	C _{орг.}	Fe	Mn	Zn	Cu	Сумма (из 9)
ПДК, мг/л		0.4	0.05	0.02	9	10	0.1	0.01	0.01	0.001	
Февраль (0.6***)	О*	1	1	1	-**	1	1	1	1	1	8 (из 8)
	П	5	3	2	1	1	1	5	1	1	20
	В	4	4	4	1	1	1	5	1	3	24
	С	3	1	1	1	1	1	4	1	2	15
	Ч	2	3	1	1	1	1	5	1	1	16
	Б	2	1	1	1	1	1	5	3	3	18
Апрель (24.6)	О	1	1	1	-	1	1	1	1	2	9 (из 8)
	П	4	3	3	1	1	1	5	1	2	21
	В	2	3	1	1	1	1	3	1	3	16
	С	1	1	1	1	1	1	3	1	1	11
	Ч	1	3	1	1	1	1	3	1	1	13
	Б	1	1	1	1	1	1	5	1	1	13
Август (151.5)	О	1	1	1	3	1	1	1	1	2	12
	П	2	2	4	1	1	1	4	1	2	18
	В	1	2	1	1	1	1	4	1	2	14
	С	1	1	1	1	1	2	5	2	2	16
	Ч	1	1	1	1	1	1	3	1	1	11
	Б	1	1	1	1	1	1	5	1	2	14
Ноябрь (28.7)	О	-	1	1	-	1	1	1	1	1	7 (из 7)
	П	5	4	4	1	1	1	5	1	2	24
	В	4	4	4	1	1	1	5	1	3	24
	С	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
	Ч	1	3	1	1	1	1	4	1	1	14
	Б	1	1	1	1	1	1	5	1	1	13

*О – р. Объяснения, П – р. Первая Речка, В – р. Вторая Речка, С – р. Седанка, Ч – р. Черная Речка, Б – р. Богатая.

«-» – отсутствие данных. * – сумма жидких атмосферных осадков за предшествующие отбору 15 сут, мм.

Анализ степени загрязнения биогенными элементами низовьев рек Владивостока выявил значительную пространственную и сезонную неоднородность качества воды. Исследования показали, что устьевая зона р. Объяснения испытывает сильные изменения качества воды (Шамов и др., 2025) в силу регулярного сброса больших объемов морской воды из системы охлаждения ТЭЦ-2. Химический состав воды при этом меняется с гидрокарбонатно-кальциевого (пресного) на хлоридно-натриевый (морской), минерализация повышается до 54000 мг/л, а содержание биогенных элементов и тяжелых металлов остается в норме, т.е. геоэкологическое состояние по этим показателям можно считать благополучным.

Реки Первая Речка и Вторая Речка подвержены наибольшему антропогенному воздействию по содержанию биогенных элементов и тяжелых металлов. В осенне-зимний меженный период (ноябрь–февраль) в них зафиксирован очень высокий уровень загрязнения (см. табл. 1), обусловленный низкой водностью рек, что способствует концентрированию загрязняющих веществ в водной среде. В период весеннего половодья (апрель) и во время летних дождевых паводков существенного улучшения качества воды в данных реках не наблюдается. Это свидетельствует о наличии постоянных источников сбросов, которые при увеличении водности не подвержены значимому разбавлению. Кроме того, выявленная динамика указывает на недостаточную эффективность действующих систем водоотведения и очистки сточных вод.

Река Черная Речка демонстрируют сезонную динамику: загрязнение снижается в паводковый период (август), но вновь возрастает к осени. Такая картина указывает на

частичное разбавление при достаточной величине водного стока, однако высока вероятность повторного загрязнения в осенне-зимний меженьный период.

Река Седанка характеризуется высоким уровнем загрязнения в зимний период и умеренным уровнем в остальные сезоны. Особое внимание привлекает река Богатая, в низовьях которой качество воды по биогенным элементам остается стабильно высоким в течение всего года, за исключением конца зимы, когда возрастает содержание аммонийного азота в водах. Это позволяет рассматривать указанные две реки как условно фоновые и использовать их в качестве эталона при оценке геоэкологического состояния других рек.

Постоянно высокие концентрации марганца в реках Владивостока, объясняемые сложным характером его геохимии – динамичным переходом между окисленными и восстановленными формами, зависимостью от pH и содержания растворенного кислорода, – свидетельствуют о системном характере явления и требуют дополнительного изучения с целью выявления конкретных источников поступления марганца в реки.

Таким образом, геоэкологическое состояние верховьев изученных рек оценивается как благополучное. В низовьях городских рек наблюдаются следующие закономерности:

- качество воды прямо зависит от водности: в осенне-зимний период (при низком стоке) фиксируется существенное ухудшение качества, а в период весеннего половодья и летних дождей – улучшение;
- приоритетными загрязнителями выступают аммоний, нитриты, фосфаты, марганец и медь, концентрации которых чаще всего – особенно в холодный период года – превышают предельно допустимые нормы;
- наиболее выраженное загрязнение биогенными веществами и некоторыми металлами стабильно фиксируется в низовьях рек Первая Речка и Вторая Речка — независимо от сезона они демонстрируют худшие показатели по сравнению с другими водотоками;
- наиболее благоприятная обстановка по содержанию биогенных веществ отмечена в р. Богатая ниже водохранилища; относительно чистая вода (особенно в летний многоводный период) отмечается для р. Седанка — эти водотоки могут служить эталоном для оценки фонового состояния речных систем района исследований.

Для улучшения состояния рек необходим дифференцированный подход к его контролю и управлению с учетом гидрологического режима и степени антропогенной нагрузки.

Список литературы:

- ГОСТ Р 59025-2020 «Качество воды. Метод исследования качества поверхностных вод по анализам-маркерам при регламентировании и нормировании антропогенной нагрузки» / национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2020.
- Зубарев В.А. Гидрохимические индексы оценки качества поверхностных вод // Региональные проблемы. 2014. Том 17. № 2. С. 71–77.
- Луценко Т.Н., Шестеркин В.П. Шестеркина Н.М. Пространственно-временная динамика химического состава речных вод российской части бассейна реки Уссури // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 3. С. 65–80.
- Приказ Росрыболовства от 26.05.2025 № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» // КонсультантПлюс: справочно-правовая система. Режим доступа: URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_47566/ (дата обращения: 14.01.2026).
- Шамов В.В., Юрченко С.Г., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н., Лупаков С.Ю., Вшивкова Т.С., Никулина Т.В. Гидролого-гидрохимическая характеристика малых рек города Владивосток // Тихоокеанская география. 2025. № 1. С. 33–47.

Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Киселев В.И. Металлы в речных водах Приморского края // Геохимия. 2007. № 1. С. 79–88.

Anastasopoulos P., Akratos C.S. A Review on Water Quality Indices // Hydroecology and Engineering. 2025. Vol. 2. P. 10003.

УДК 556.114.6

СОВРЕМЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДЕ ВЕРХНЕВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Григорьева И.Л.

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок, Россия,

Irina_Grigorieva@list.ru

Аннотация. По результатам натурных исследований летом 2025 г. проведена оценка современного содержания органического вещества (ОВ) в воде четырех верхневолжских водохранилищ: Иваньковского, Угличского, Рыбинского и Шекснинского. Получены диапазоны изменения показателей ОВ, выявлены участки с наибольшей органической нагрузкой. Показано, что наименьшие величины ХПК и $C_{\text{орг.}}$ зафиксированы в воде Угличского водохранилища.

Ключевые слова: бассейн верхней Волги, водохранилища, показатели органического вещества

Природные воды содержат, кроме растворенных газов и минеральных веществ, то или иное количество органического вещества (Никаноров, 2008). Органическое вещество (ОВ) накапливается в воде водоемов в результате приноса с речным стоком (аллохтонное), выделения из донных отложений и продуцирования гидробионтами и высшей водной растительностью (автохтонное), а также поступления с атмосферными осадками и сточными водами (Структура, 2018). Надежным показателем суммарного содержания органического вещества в природных водах является органический углерод ($C_{\text{орг.}}$) (Никаноров, 2008).

Наиболее простым и распространенным способом характеристики содержания ОВ является метод определения окисляемости воды по количеству кислорода, расходуемого на окисление этого вещества. В зависимости от применяемого окислителя различают перманганатную (ПО) и бихроматную окисляемость (Никаноров, 2008). Величину бихроматной окисляемости принято называть химическим потреблением кислорода (ХПК). На присутствие в воде аллохтонного ОВ гумусовой природы указывает ее цветность (Цв). Для оценки содержания легкоокисляющихся органических веществ используется такой показатель, как БПК (биохимическое потребление кислорода).

Целью настоящей работы была оценка современного содержания ОВ в воде Иваньковского, Угличского, Рыбинского и Шекснинского водохранилищ по результатам расширенных комплексных съемок Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН в июле–августе 2025 года, который стал одним из самых теплых на территории Европейской части России за историю метеорологических наблюдений.

Для оценки содержания ОВ пробы воды отбирались в соответствии со стандартными методиками, в которых определялись такие показатели, как цветность, БПК₅ и ХПК. Содержание органического углерода ($C_{\text{орг.}}$) определялось расчетным методом по ХПК. Рассчитывались также соотношения БПК₅/ХПК в процентах и Цв/ $C_{\text{орг.}}$.

Первый расширенный рейс по Рыбинскому водохранилищу в 2025 г. состоялся 3–8 июля. Пробы воды были отобраны из поверхностного горизонта на станциях: Сить, Первомайка, Себла, Противье, Центральный Мыс, Ягорба, Мякса, Волково, Ухра, Всехсвятское, Каменники.

Температура воды в период рейса изменялась от 17.3°C (Всехсвятское) до 18.2°C (Противье). Цветность воды, в основном, варьировала в диапазоне 40–60 градусов Cr-Co шкалы, но на двух станциях (Себла и Противье) достигала 90 градусов Cr-Co шкалы. Прозрачность воды изменялась от 90 см (Первомайка, Себла, Ухра, Всесвятское) до 130 см (Центральный мыс, Ягорба, Мякса).

На семи станциях значения БПК₅ были ниже ПДК_{р/х} (2.1 мгО/л), а на четырех превышали ПДК_{р/х}: Первомайка (2.91 мгО/л), Себла (2.53 мгО/л), Мякса (2.41 мгО/л),

Всехсвятское (2.60 мгО/л). На большинстве станций диапазон изменения ХПК составил 31.9–40.4 мгО/л. Наибольшее значение зафиксировано на станции Первомайка (72.7 мгО/л), высокие значения также наблюдались на станциях: Противье (53.8 мгО/л) и Себла (50 мгО/л).

Среднее количество лабильной фракции в воде Рыбинского водохранилища, рассчитанное по данным в средние по водности 1981–1982 гг., составляет 4.2% общего содержания ОВ. Эту цифру в первом приближении можно рассматривать как некую региональную константу, которая позволяет оценивать происходящие изменения в качественном составе ОВ (Бикбулатова и др., 2006). Наибольший вклад лабильной фракции (6.8%) в ОВ в начале июля 2025 г. из рассмотренных станций наблюдался на ст. Всехсвятское, а наименьший (1.8 мгО/л) – на ст. Противье. На остальных станциях отношение БПК5/ХПК было или на уровне 4.0 мгО/л, или выше.

Относительное участие окрашенных гуминовых соединений во всей массе органического вещества в водоеме может быть оценено по соотношению Цв/Сорг. В годовом цикле для Рыбинского водохранилища его высокие среднемесячные значения (до 6.64) в весенний период свидетельствуют о преобладании вклада в общее ОВ соединений гумусовой природы, а минимумы к концу лета (до 2.66) – автохтонных (малоцветных) веществ (Степанова, 2015).

Второй расширенный рейс по Рыбинскому и Шекснинскому водохранилищам в 2025 г. состоялся 17–24 июля. В Рыбинском водохранилище отбор проб воды был произведен на станциях: Любец, Торово, Суда, Кошта, Ваганиха, Кабачино, Селин, Чагино. Температура воды во время этого рейса изменялась от 22.1°C (ст. Любец) до 24.3°C (с. Чагино), прозрачность варьировала от 60 см (Суда, Торово) до 110 см (Любец). Цветность воды изменялась в большом диапазоне: от 55 град. Сг-Со шкалы (Селин) до 220 град. Сг-Со шкалы (Суда, Торово).

На всех станциях, кроме Суда, значения БПК5 превышали ПДКр/х. Значения ХПК и Сорг. изменялись соответственно в диапазоне от 33.8 мгО/л (Кабачино) до 77.8 мгО/л (Суда) и от 12.7 мг/л (Кабачино) до 29.2 мг/л (Суда). Наиболее высокие значения отношения БПК5/ХПК зафиксированы на ст. Кабачино (6.9%), Кошта (6.3%) и Ваганиха (5.5%). Наибольшие значения отношения Цв/Сорг. наблюдались на ст. Торово (8.06), Суда (7.53) и Ваганиха (6.28).

В Шекснинском плесе Шекснинского водохранилища отбор проб воды был произведен на станциях: Чуровка, центр приплотинного плеса; Аристово, Сиземское расширение; Топорня; Горицы; Чайка. Температура воды в плесе изменялась от 22 до 24.9°C, а прозрачность – от 60 до 150 см, диапазон цветности воды составил 60–80 град. Сг-Со шкалы. Значения БПК5 превышали ПДКр/х в июле 2025 г. на трех станциях: Сиземское расширение (3.49 мгО/л), Топорня (6.41 мгО/л) и Чайка (2.62 мгО/л). Значения ХПК варьировали в диапазоне 35.3–59.8 мгО/л. Концентрации органического углерода изменялись от 13.2 до 22.4 мг/л. Наиболее высокие значения отношения БПК5/ХПК зафиксированы в Сиземском расширении (9.9%) и на ст. Чайка (6.7%). Наибольшие значения отношения Цв/Сорг. наблюдались на ст. Горицы (8) и ст. Сиземское расширение (5.3).

Станциями отбора проб воды в Белозерском плесе Шекснинского водохранилища были: залив у Белозерска; Липин Бор; пос. Киуй; Белое озеро, центр; Кустово; Водоба, против устья р. Ковжа; Крохино.

Температура воды в Белозерском плесе была несколько ниже, чем в Шекснинском плесе (20.5–23.0°C). Цветность воды в нем была также ниже, а прозрачность выше (120–180 см), чем в Шекснинском плесе. Из-за более низкой температуры и цветности воды все показатели ОВ в Белозерском плесе были ниже, чем в Шекснинском плесе.

Отбор проб воды в Угличском водохранилище был осуществлен 15–21 августа 2025 г. на станциях: Грехов ручей, Прилуки, Калязин, Кашинка, Нерль, Медведица, Белый городок, Кимры и Дубна.

Температура воды в водохранилище во время отбора проб воды изменялась от 20.9°C (Кимры) до 21.8°C (Грехов ручей). Прозрачность воды варьировала от 100 см в устье

Медведицы до 140 см в устье Грехова ручья. Цветность воды на большинстве станций колебалась в интервале 40–50 град. Сг-Со шкалы, а в устье Нерли она достигала 75 град. Сг-Со шкалы. В четырех створах значения БПК₅ были выше ПДК_{р/х}: Прилуки (2.19 мгО/л), Калязин (2.37 мгО/л), Белый Городок (3.91 мгО/л), Дубна (2.60 мгО/л). Диапазон изменения значений ХПК составил: 27 мгО/л (Нерль) – 35.6 мгО/л (Кимры). Концентрации Сорг. изменялись от 10.1 мг/л (Нерль) до 13.4 мг/л (Кимры).

Наибольший вклад лабильной фракции в общее ОВ было отмечено на станциях: Белый Городок (11.4%), Калязин (8.1%), Нерль (7.2%), Дубна (7.6%). Самый большой вклад в общее ОВ соединений гумусовой природы отмечено на станции Нерль, а наименьший на ст. Кимры.

В Ивановском водохранилище отбор проб воды осуществлялся на станциях: Липня, Укодovo, Корчева, Созь, Мошковичский залив, Свердловo, выше устья Шошинского плеса, Шошинский плес, Видогощ, Городня. Температура воды во время отбора проб воды изменялась от 19.6°C до 21.5°C. В устье Мошковичского залива, в который поступают подогретые воды от Конаковской ГРЭС, температура воды равнялась 24.9°C. Значения цветности воды изменялись, как и в Угличском водохранилище, от 40 до 50 град. Сг-Со шкалы.

Все показатели содержания ОВ, кроме цветности, в воде Ивановского водохранилища были выше, чем в воде Угличского. Значения БПК₅ колебались в интервале от 2.25 мгО/л (Уходoво, Корчева) до 4.44 мгО/л (Мошковичский залив), значения ХПК изменялись от 32.9 мгО/л (Уходoво) до 52.8 мгО/л (Шошинский плес), а концентрации органического углерода варьировали от 12.3 мг/л (Уходoво) до 19.8 мг/л (Шошинский плес). Таким образом, в устьях Шошинского плеса и Мошковичского залива содержание ОВ в воде было выше, чем в замыкающих створах. Максимальные значения ХПК зафиксированные в воде Ивановского водохранилища летом 2025 г. были выше, чем представленные в работе (Григорьева, Чекмарева, 2025).

В августе 2025 г. в мелководном Ивановском водохранилище образование ОВ происходило преимущественно за счет внутриводоемных процессов. Доля легко окисляемой органики в содержании общего ОВ была наибольшей в устьях Мошковичского залива, в устье Шошинского плеса, а также в районе затопленного озера Видогощ: соответственно 13.2, 10.8 и 11.2%.

Таким образом, по результатам расширенных комплексных съемок Рыбинского, Шекснинского, Угличского и Ивановского водохранилищ были определены диапазоны изменения величин показателей ОВ. Самые высокие значения ХПК и органического углерода были отмечены на отдельных участках Рыбинского водохранилища. Высокие значения ХПК и концентрации органического углерода отмечались в Ивановском водохранилище.

Наименьшую органическую нагрузку из верхневолжских водохранилищ в настоящее время испытывает Угличское водохранилище и Белоозерский плес Шекснинского водохранилища.

В летний период в верхневолжских водохранилищах новообразование органического вещества происходит за счет внутриводоемных процессов, интенсивность которых в значительной степени зависит от метеорологических условий (Гречушникова и др., 2024).

Работа выполнена в рамках темы 124032100076-2 Государственного задания Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН.

Список литературы:

Бикбулатова Е.М., Бикбулатов Э.С., Степанова И.Э. Формы, масштабы и изменчивости поступления органических веществ в Рыбинское водохранилище // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. №1. С. 1–11.

Гречушникова М.Г., Григорьева И.Л., Ломова Д.В., Кременецкая Е.Р., Комиссаров А.Б., Федорова Л.П., Ломов В.А., Чекмарева Е.А. Формирование гидроэкологической структуры

Иваньковского водохранилища в летний период в смежные годы с различными погодными условиями // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 3. С. 373–388.

Григорьева И.Л., Чекмарева Е.А. Изменение содержания органического вещества в верхневолжских водохранилищах за многолетний период // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов [Электронный ресурс]: труды X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (г. Пермь, ПГНИУ, 29 мая – 1 июня 2025 г.) / науч. ред. А.Б. Китаев, О.В. Ларченко; Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2025. С. 278–282.

Никаноров А.М. Гидрохимия. Ростов-на-Дону: «НОК», 2008. 462 с.

Степанова И.Э. Характеристики органического вещества в Рыбинском водохранилище на современном этапе // Вода: химия и экология. 2015. № 10. С. 3–10.

Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века / ред. В. И. Лазарева; РАН, Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина. М.: РАН, 2018. 456 с.

УДК 556.013

ОЦЕНКА ВКЛАДА ИСТОЧНИКОВ ПОСТУПЛЕНИЯ ТВЕРДОГО СТОКА МЕТОДОМ ТРАССИРОВКИ ИСТОЧНИКОВ НАНОСОВ

Гирло Е.М.^{1,2}, Чалов С.Р.^{1,2}, Харченко С.В.^{1,3}

¹ Московский государственный университет, Москва, Россия, *kate.girlo.m@gmail.com*

² Институт водных проблем РАН, Москва, Россия.

³ Институт географии РАН, Москва, Россия.

Аннотация. Формирование взвешенных наносов на урбанизированных водосборах определяется несколькими источниками, соотношение которых слабо изучено. В работе оно количественно оценено методом трассировки источников наносов на примере бассейна р. Сетунь. Метод основан на использовании химических элементов в качестве трассеров и статистических моделей сепарации смеси. Установлено, что доминирующим источником взвешенных наносов в бассейне р. Сетунь являются береговые уступы, а также обоснована необходимость адаптации методики для городских территорий.

Ключевые слова: взвешенные наносы, оценка долевых вкладов, фингерпринтинг, урбанизированные водосборы

Реализация метода трассировки источников наносов (фингерпринтинг) (Гирло и др., 2025) заключается в идентификации и количественной оценке долевых вкладов различных источников поступления взвешенных наносов в речные системы. В условиях урбанизированных водосборов формирование взвешенных наносов определяется сочетанием природных и антропогенных факторов, что существенно усложняет структуру источников и требует применения количественных методов анализа, в том числе статистических моделей сепарации смеси. Оценка долевых вкладов выполнена с использованием четырех моделей: основанных на классической вероятностной статистике *fingerPro* (Lizaga et al., 2020), *Bootstrapped Mixing Model (BMM)* (Batista et al., 2022) и байесовских – *simmr* (Govan et al., 2023), *MixSIAR* (Stock et al., 2018). Модели *MixSIAR* и *BMM* реализованы в пакете *fingerR* (Chaloux-Clergue et al., 2024).

Объектом исследования является бассейн реки Сетунь, расположенный в пределах города Москвы и частично на территории Московской области. Гидролого-геохимический мониторинг на Сетуни велся с 2019-2023 г., соответственно, на настоящий момент сформирована репрезентативная база данных. Бассейн Сетуни имеет пеструю структуру зон землепользования: транспортная, промышленная и рекреационная зоны, приуроченные к долине реки.

В качестве источников взвеси рассматриваются поверхностный горизонт почв, дорожная пыль и свежие экзогенные размывы береговых уступов, формирующие смесь взвешенных наносов в русле реки. Мишенью (Гирло и др., 2025) выступают взвешенные наносы, отбираемые в контрольных створах. В рамках исследования проводится отбор проб источников и целевых образцов, анализ валовых концентраций химических элементов с последующей коррекцией на гранулометрический состав (Gaspar et al., 2022).

Ключевым этапом реализации метода является выбор репрезентативных трассеров, обеспечивающих статистически устойчивое разделение источников. В работе используется консенсусный подход (*Consensus method*) выбора трассеров, реализованный в пакете *FingerPro* (Lizaga et al., 2020), который позволяет учитывать показатели консервативности и согласованности трассеров и снижать неопределенность расчетов (Latorre et al., 2021). Оценка долевых вкладов источников выполняется с применением как классических вероятностных, так и байесовских моделей сепарации смеси. Выбор трассеров является ключевым моментом реализации метода, при корректно подобранных трассерах различные модели в процессе сепарации дают сопоставимые результаты (Latorre et al., 2025).

На рис. 1 представлен доленой вклад источников, осредненный по результатам четырех моделей сепарации смеси. На протяжении всего периода наблюдений доминирующим источником взвешенных наносов остаются береговые уступы. Вклад поверхностных почв и дорожной пыли меняется в зависимости от фазы водного режима, не превышая вклада берегов. Использование нескольких моделей сепарации повышает надежность получаемых оценок и обеспечивает комплексный подход к анализу формирования взвеси.

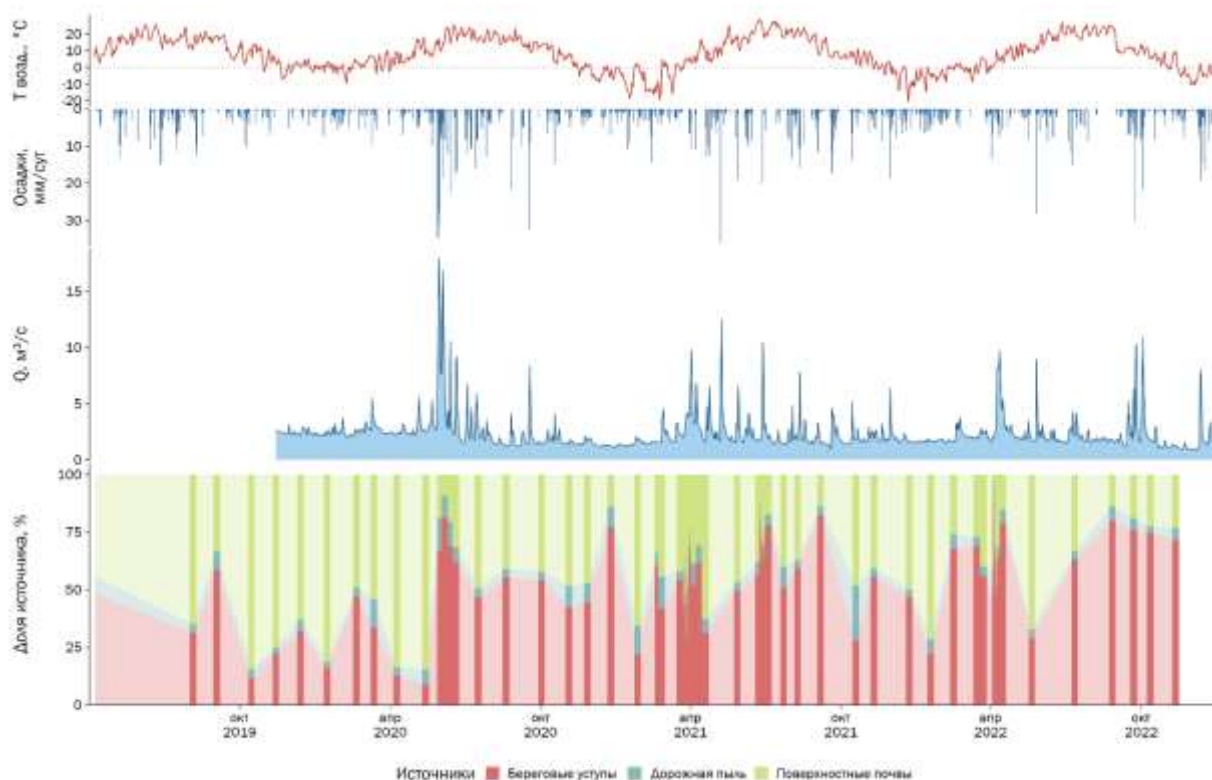


Рис. 1. Гидрометеорологические условия и доленой вклад источников взвешенных наносов в бассейне р. Сетунь (2019–2022 гг.). Насыщенным цветом показаны доленой вклады, рассчитанные для дат отбора проб взвешенных наносов; приглушенным — их линейная интерполяция между датами опробования. Сверху вниз: температура воздуха; атмосферные осадки; расход воды Q ; доленой вклад источников, осредненный по четырем моделям сепарации смеси (FingerPro, simmr, MixSIAR, BMM).

Полученные результаты могут быть использованы при разработке мероприятий по управлению потоками наносов и снижению загрязнения водных объектов в условиях городской среды.

Благодарности: Полевые работы выполнены при поддержке проекта РНФ 25-17-00073, химико-аналитические работы – при поддержке проекта Правительства Российской Федерации, реализуемого в рамках Соглашения №075-15-2025-008 от 27.02.2025

Список литературы:

Гирло Е.М., Чалов С.Р., Харченко С.В. Оценка поступления взвешенного вещества в реки методом трассировки источников наносов для решения задач управления урбанизированным водосбором // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 26–51. DOI: 10.35567/1999-4508-2025-6-26-51

Batista P.V.G., Laceby J.P., Evrard O. How to Evaluate Sediment Fingerprinting Source Apportionments. // J. Soils Sediments. Vol. 22. P. 1315–1328. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03157-4>, 2022.

Chaloux-Clergue T., Bizeul R., Batista P., Martínez-Carreras N., Laceby J., Evrard O. Sensitivity of source sediment fingerprinting to tracer selection methods. // SOIL. 2024. Vol. 10. P. 109–138. DOI:10.5194/soil-10-109-2024

Gaspar L., Blake W., Lizaga I., Latorre B., Navas A. Particle size effect on geochemical composition of experimental soil mixtures relevant for unmixing modelling. // Geomorphology. 2022. Vol. 403. 108178. DOI:10.1016/j.geomorph.2022.108178

Govan E., Jackson A., Inger R., Bearhop S., Parnell A. simmr: A package for fitting Stable Isotope Mixing Models in R. 2023. DOI:10.48550/arXiv.2306.07817

Latorre B., Lizaga I., Gaspar L., Navas A. A novel method for analysing consistency and unravelling multiple solutions in sediment fingerprinting // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 789. 147804. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147804

Latorre B., Lizaga I., Gaspar L., Navas A. Evaluating the impact of high source variability and extreme contributing sources on sediment fingerprinting models // Water Resources Management. 2025. Vol. 39. P. 4589–4603. DOI: 10.1007/s11269-025-04169-8.

Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment. // Water Resources Management. 2020. Vol. 34. P. 3879–3894. DOI:10.1007/s11269-020-02650-0

Stock B., Jackson A., Ward E., Parnell A., Phillips D., Semmens B. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models. // PeerJ. 2018. Vol. 6. e5096. DOI:10.7717/peerj.5096

УДК 556.55

ВНУТРЕННЯЯ И ВНЕШНЯЯ ФОСФОРНАЯ НАГРУЗКА ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Гречушникова М.Г.^{1,2}, Ломова Д.В.², Пуклаков В.В.¹, Ломов В.А.¹, Куликова Я.В.²

¹Московский государственный университет, Географический факультет, Москва, Россия, *allavis@mail.ru*

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

Аннотация. Показано соотношение внешней и внутренней фосфорной нагрузки Иваньковского водохранилища по данным наблюдений. Использованы материалы исследований за 2020–2024 гг. и результаты ежемесячного анализа проб в притоках водохранилища за 2022–2023 гг. Наибольший выход фосфора из донных отложений наблюдается в периоды аноксии в придонном слое и приурочен к участкам, занятым донными отложениями с высоким содержанием органического вещества. Использование математической модели ГМВ-МГУ позволило определить продолжительность этих периодов с дефицитом кислорода при отсутствии режимных наблюдений. Получено, что внутренняя фосфорная нагрузка водохранилища превышает внешнюю.

Ключевые слова: фосфаты, внутренняя нагрузка, водохранилище, донные отложения

Избыточное поступление в водные объекты биогенных элементов - главная причина эвтрофирования водоемов (Даденко, 2007). В эвтрофных водоемах поток лабильных форм фосфора и азота из донных отложений (ДО) в воду также вносит существенный вклад в этот процесс. Растворенный фосфор выделяется из донных отложений в виде диффузионного потока, а также при взмучивании, биотурбации и пузырьковом газовыделении. Основные факторы, влияющие на величину потока фосфора из ДО: окислительно-восстановительный потенциал, pH, температура, содержание органического вещества (ОВ) а также микробиологическая активность (Мартынова, 2010). Соотношение внутренних и внешних источников поступления фосфора в водоемы по разным литературным источникам существенно различаются, так внутренняя фосфорная нагрузка может составлять от 1 до 71% от величины внешней нагрузки (Мартынова, 1984; Китаев, 2007; Кондратьев и др., 2021).

Цель данной работы – по результатам полевых наблюдений и экспериментальных исследований оценить внутренний приток фосфора из донных отложений с учетом их пространственной неоднородности и внутригодовой изменчивости и сопоставить его с притоком фосфора с водосбора Иваньковского водохранилища.

Иваньковское водохранилище относится к водоемам долинного типа. Площадь водного зеркала при НПУ 316 км², объем – 1.12 км³, средняя глубина 3.4 м, наибольшая – 19 м. Водохранилище относительно мелководно (глубины от 0–2 м занимают 48% от площади водоема) (Иваньковское водохранилище, 2000, Приказ..., 2019). Средний многолетний коэффициент водообмена для водохранилища 10.3 год⁻¹, при этом для водоема характерна как внутригодовая, так и межгодовая изменчивость интенсивности водообмена в зависимости от водности года. Донные отложения представлены разнообразными типами грунта в зависимости от района и морфологических частей затопленной долины: в русле преобладают относительно богатые органическим веществом донные отложения, на пойме и в верхней части водоема преобладает заиленный песок (Законнов и др., 2018). Для определения внешней нагрузки водоема фосфатами в 2022–2023 гг. проведены ежемесячные отборы проб в устьевых створах 15 притоков Иваньковского водохранилища. Поступление фосфатов в водную массу из донных отложений определялось во время проведения комплексных гидролого-гидрохимических съемок водохранилища в 2020–2024 гг. Измерения производились на шести опорных станциях: Городня, Шоша, Плоски, Конаково, Корчева, Дубна.

Определение потока фосфора из донных отложений проводилось методом трубок (Sweerts et al., 1991). К главным факторам, которые формируют внутреннюю биогенную

нагрузку, относятся сезонное изменение первичной продуктивности водоема и его кислородный режим (Мартынова, 2010). Для уточнения периодов с дефицитом кислорода в придонном слое (менее 2 мг/л), во время которых происходит интенсивный выход фосфора из донных отложений, была использована математическая квазидвухмерная модель ГМВ-МГУ (Эдельштейн и др., 2012), которая основана на одномерном алгоритме расчета вертикальной структуры водоема (Wlosinski et al., 1995), примененном к последовательности расчетных отсеков, на которые делится водохранилище. Алгоритм модели, кроме расчета балансовых и гидродинамических составляющих режима водохранилища, включает также и экологический блок, позволяющий рассчитывать изменения химических и биологических характеристик водной массы в соответствии с концептуальными схемами их взаимосвязей в водной экосистеме, в том числе и режим растворенного в воде кислорода. Интенсивность потребления кислорода зависит от типа отложений, распределение которых в долинных водохранилищах определяется морфологическим строением затопленного ложа (затопленное речное русло, пойма и надпойменные террасы), оценивалась по данным экспериментальных наблюдений (Ломова, 1995).

Отбор проб для р. Волга производили в створе д. Рябеево ниже устья р. Тьмы и выше г. Тверь и в створе д. Горохово ниже выпуска очистных сооружений Твери в 12 км ниже впадения р. Тверца для оценки вклада городских стоков во внешнюю фосфорную нагрузку водохранилища. На малых притоках отбор производился в близких к устьям створах выше зоны подпора. Для крупных притоков (рек Волга, Тьма, Тверца, Лама), сведения о расходах воды получены из открытого источника АИС ГМВО²⁶. Сток Шоши определен по аналогу (р. Лама). Для расчета притока фосфатов с гидрометрически неизученной территории концентрация фосфатов как средневзвешенная величина с учетом площади водосборов малых рек. Их суммарный водный сток определен по разности суммарного притока в водохранилище и стока крупных притоков. Приток фосфатов в водохранилище в 2022–2023 гг. с водосбора выше г. Тверь составил 529 и 653 т для р. Волги и 220 и 392 т для р. Тверцы, итого 749 и 1045 т, соответственно. По данным пробоотборов в 2022 и 2023 гг. общий приток фосфатов в водохранилище с использованием данных пункта Горохово составил 1359 и 2125 т. То есть внешняя фосфорная нагрузка на водохранилище с учетом влияния сточных вод города возрастает в 1.8–2 раза.

Поступление фосфатов с водосбора ниже Горохово (бассейны Ламы, Шоши и др. притоков, рис. 1) составило в 2022–2023 гг. 160 и 246 т. Таким образом, несмотря на значительное содержание фосфатов в некоторых реках, из-за малой величины водного стока их суммарный вклад на порядок меньше, чем поступление фосфатов со стоком р. Волга. Итого приток фосфатов с речными водами оценивается в 1519 и 2371 т или в пересчете на фосфор фосфатов 495 и 773 тР-РО₄/год.

Погодные условия определяют гидрологическую структуру водохранилища, устойчивость его водной толщи к перемешиванию и длительность существования зоны аноксии в гипolimнионе, что непосредственно влияет на поступление фосфора из ДО в придонные слои воды и далее в фотическую зону. В свою очередь, это становится основным фактором роста автохтонной нагрузки на водоем и определяет интенсивность «цветения воды» в летний период (Эдельштейн и др., 2020). По данным гидролого-гидрохимических съемок Ивановского водохранилища в 2020–2024 гг. наибольший выход фосфора из донных отложений наблюдается в периоды дефицита кислорода в придонном слое и приурочен к русловым участкам, занятым отложениями, богатыми органическим веществом (табл. 1).

Путем умножения величины потока фосфора из донных отложений районов на занимаемую ими площадь и время получено, что в 2020–2022 гг. (для которых проведено моделирование режима водохранилища) внутренняя фосфорная нагрузка в Ивановском водохранилище изменялась от 1646 до 1903 т Р_{мин} в год. При этом на русловую ложбину,

²⁶ <https://gmvo.skniivh.ru/>

Таблица 1. Выход минерального фосфора из донных отложений Иваньковского водохранилища с учетом их пространственной неоднородности по данным измерений, мгР_{мин}/м² сут.

Район	1 Городня	2 Плоски	3 Конаково	4 Корчева	5 Дубна	6 Шошинский плес
Затопленная русловая ложбина						
март	-	5	6,6	4,3	3,8	10,5
май-июнь	-	43,5	31	34	47,3	11,1
август	-	51	46	51,3	59,2	42,4
Затопленная пойма и терраса, по данным (Процессы..., 2019) в зависимости от содержания ОВ и общей деструкции						
март	2	2	2	2	2	2
май-июнь	2	15	15	35	35	15
август	2	10	15	35	35	10

несмотря на большую интенсивность выхода фосфора, приходится всего 36-38% от общего выхода фосфора из ДО из-за меньшей ее площади.

Выводы: Фосфорная автохтонная нагрузка, поступающая из донных отложений водохранилища соизмерима с поступлением с речными водами. Выход фосфора из донных отложений усиливается в периоды аноксидных условий в придонных горизонтах, которые чаще наблюдаются во второй половине лета. Т.е. при сокращении речного притока в межень роль поступления фосфатов из донных отложений возрастает. Наибольший поток фосфатов из донных отложений характерен для участков русловой ложбины. По сравнению со среднемноголетними данными за 1958-2004 гг. приток фосфора в водоем с водосбора снизился, но треть общей нагрузки составляют сточные воды г. Тверь.

Работа выполнена в рамках темы ГЗ ИВП РАН № FMWZ-2025-0002. Моделирование проведено в рамках работ по теме ГЗ кафедры гидрологии суши географического ф-та МГУ «Гидрологический режим и экологическое состояние водных объектов суши в условиях современного и будущего климата и антропогенного воздействия»

Список литературы:

- Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
- Законнов В.В., Григорьева И.Л., Законнова А.В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги // Водное хозяйство России. 2018. № 3. С. 35–48.
- Иваньковское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
- Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. 395 с.
- Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю., Игнатъева Н.В., Шмакова М.В., Обломкова Н.С., Коробченкова К.Д. Внешняя и внутренняя фосфорная нагрузка на крупный трансграничный водоем в условиях минимальной проточности// Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14(4). С. 77–89.
- Ломова Д.В. Об оценке потребления кислорода грунтами водохранилища // Водные ресурсы. 1995. № 2. С. 16–20.

- Мартынова М.В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М.: Наука, 1984. 160 с.
- Мартынова М.В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 2010. 243 с.
- Приказ Росводресурсов от 31.05.2019 № 125 «Об утверждении Правил использования водных ресурсов Иваньковского водохранилища на р. Волге».
- Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Диагностическое моделирование внутриводоемных процессов в водохранилищах // Водные ресурсы. 2012. № 4. С. 437–450.
- Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г., Гончаров А.В. Влияние изменчивости погоды на биопродуктивность Можайского водохранилища // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5: Геогр. 2020. № 2. С. 36–44.
- Sweerts J., Bar-Gilissen M., Cornelse A., Cappenberg T.E. Oxygen-consuming processes at the profundal and littoral sediment-water interface of a small meso-eutrophic lake // Limnology and Oceanography. 1991. Vol. 36(6). Pp. 1124–1133.
- Wlosinski J. et al. CE-QUAL-R1: A Numerical One-Dimensional Model of Reservoir Water Quality; User's Manual. 1995. 519 p.

УДК 556.5; 550.4

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРАХ, ЛЕДНИКОВОМ СТОКЕ И СНЕГЕ ОСТРОВА СЕВЕРНЫЙ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ

Гришанцева Е.С.^{1,2}, Алентьев Ю.Ю.²

¹Московский государственный университет, Москва, Россия, *shes99@mai.ru*

²Институт географии РАН, Москва, Россия.

Аннотация. Впервые определены содержания редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в озерах, ручьях и снеге о. Северный архипелага Новая Земля. Самые низкие содержания РЗЭ были получены для вод снежника, а самые высокие для ручьев. Суммарное содержание РЗЭ в исследованных объектах составляло от 0.041 до 0.167 мкг/л.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, озера, водотоки, водные объекты, остров Северный, архипелаг Новая Земля.

Данные о содержании редкоземельных элементов (РЗЭ) в геохимических исследованиях используются для реконструкции условий образования и эволюции геологических и гидрохимических процессов. Оценка содержания РЗЭ в природных водах используется для установления источников генетических связей компонентов водной среды, процессов миграции и эволюции состава поверхностных и подземных вод (Дубинин, 2006; Вах, 2014). Уровни содержания РЗЭ в водных объектах о. Северный арх. Новая Земля изучены слабо, что связано с трудной доступностью для большинства исследователей. Вместе с тем экосистемы арктического региона претерпевают большие трансформации в связи с климатическими изменениями и возрастающим антропогенным воздействием (Архипелаг..., 2018), что определяет актуальность и научную новизну данного исследования.

Целью данного исследования является определение содержания редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в сопряженных компонентах водной среды – снеге, ручьях, озерах о. Северный арх. Новая Земля. Результаты исследования необходимы для выявления общих закономерностей поведения РЗЭ в арктических экосистемах, а также установления геохимического фона, необходимого для дальнейших эколого-геохимических исследований.

Экспедиционные исследования и отбор проб воды проводились во время комплексной экспедиции Северного Морского флота и Российского Географического Общества в августе 2025 г. в четырех районах о. Северный арх. Новая Земля, расположенных около залива Иностранцева, мыса Желаний, залива Натали, мыса Спорый Наволок (рис. 1). Объектами исследования являлись ручьи (4 пробы), озера (7 проб), снежник (1 проба). Пробы воды отбирали из поверхностного горизонта, сразу после отбора фильтровали через шприц-насадку с размером пор 0.45 мкм и подкисляли 0.5 мл HNO₃ на каждые 15 мл пробы. Измерение pH, удельной электропроводности проводилось непосредственно в точке опробования с помощью портативного анализатора. Определение концентрации микроэлементов проводили в лаборатории методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре Nexlon 1000G. Калибровочные растворы готовили на основе стандарта High Purity Standarts ICP-MS-68B (Solution A+Solution B) (100мг/л). Контроль точности измерений проводили с использованием стандарта High Purity Standarts CRM-TMDW (trace metals in drinking water).

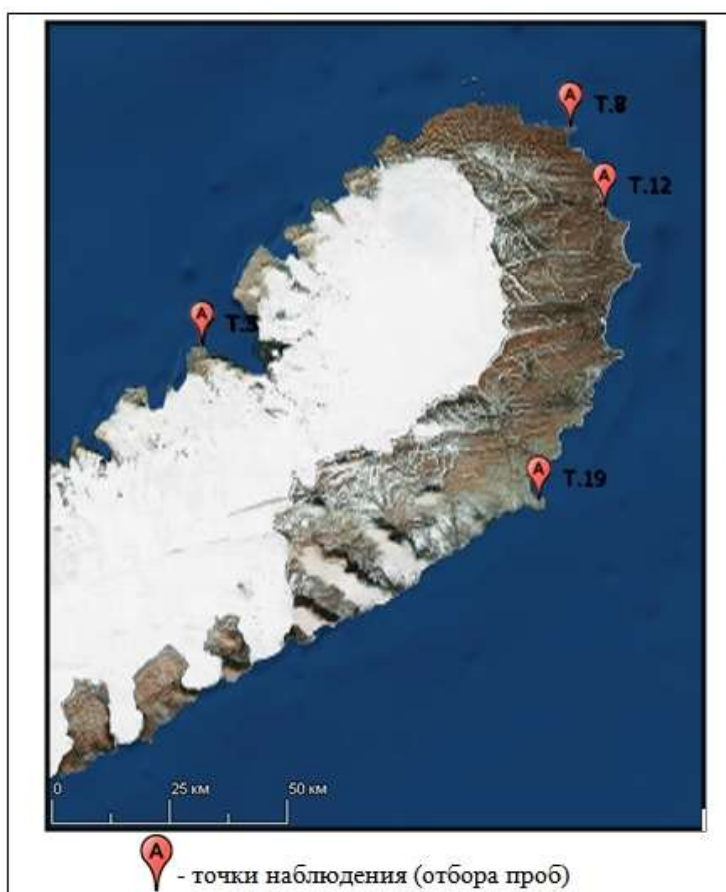


Рис. 1. Схема расположения точек наблюдения на острове Северный

Значения рН воды озер варьировали от 6.95 до 7.42, ручьев 7.03–7.71, воды снежника 6.35. Значения удельной электропроводности составляли для озер от 238 до 2247 (для оз. Аномальное), для ручьев от 294 до 927, для снежника 14.1 мкСм/см.

Результаты определения содержания РЗЭ в поверхностных водах о. Северный арх. Новая Земля приведены в табл. 1. Суммарное содержание РЗЭ в исследованных объектах составляло от 0.041 до 0.167 мкг/л. Самые высокие суммарные содержания РЗЭ были получены для озера вблизи мыса Спорый Наволок и для ручьев расположенных в западной части острова. Самые низкие концентрации получены для ручья вблизи залива Натали и в локальном водоеме вблизи мыса Спорый Наволок. Самые низкие содержания РЗЭ были получены для вод снежника, а самые высокие для ручьев (рис. 2). В озерах содержание растворенных РЗЭ ниже, чем в ручьях, что связано с процессами соосаждения и сорбции РЗЭ из раствора на оксигидроксидах железа и марганца и удалении их в осадок.

Таблица 1. Средние содержания РЗЭ (мкг/л) в ручьях, озерах и снежнике о. Северный архипелага Новая Земля

Элемент	Ручьи (n=4)	Озера (n=7)	Снежник (n=1)	Среднее в реках мира (Савенко, 2024)
La	0.018	0.14	0.011	0.12
Ce	0.029	0.027	0.022	0.262
Pr	0.005	0.003	0.003	0.04
Nd	0.019	0.014	0.009	0.152
Sm	0.004	0.003	0.003	0.036
Eu	0.0034	0.003	0.0005	0.0098

Gd	0.004	0.002	0.003	0.040
Tb	0.0006	0.0005	0.0004	0.0055
Dy	0.003	0.002	0.001	0.030
Ho	0.0006	0.0005	0.0002	0.0071
Er	0.0014	0.0014	0.0003	0.020
Tm	0.0003	0.0002	0.0001	0.0033
Yb	0.0011	0.0011	0.0003	0.017
Lu	0.0004	0.0003	0.0001	0.0024
Σ REE	0.089	0.073	0.053	0.745
LREE, %	88	88	90	83
HREE, %	12	12	10	17

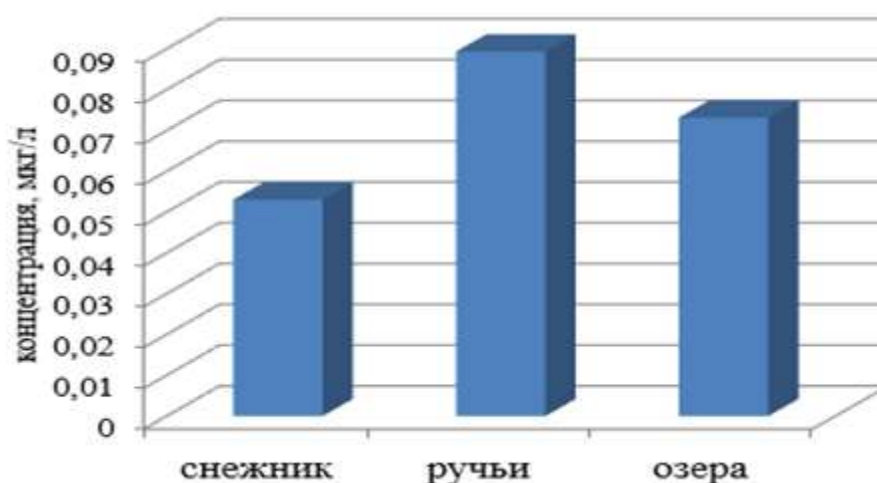


Рис. 2. Сравнение средних концентрации РЗЭ (в мкг/л) в водных объектах о. Северный.

Средние концентрации РЗЭ в образцах в целом соответствуют обобщенной последовательности $Ce > La > Nd > Pr > Gd > Sm > Eu > Dy > Er > Yb > Tb > Ho > Lu > Tm$. В исследованных водных объектах содержание легких РЗЭ выше, чем тяжелых и составляет 88–90% от суммарного содержания, что близко к соотношению, рассчитанному для средних содержаний в реках мира. Снежник наиболее обогащен легкими РЗЭ по сравнению с озерами и ручьями. Поверхностные воды обеднены легкими РЗЭ, что хорошо видно также по отношениям нормализованных на NASC содержаний La_n/Yb_n , которые для ручьев составляют 1.58, для озер 1.23, для снежника 3.55.

Спектры распределения РЗЭ нормализованные относительно североамериканского сланцевого композита (NASC) (Gromet, 1984), построенные для ручьев и озер похожи и однотипны по своей форме (рис. 3). Они имеют положительную европиевую аномалию. На спектре РЗЭ снежника европиевая аномалия отсутствует. Положительная Eu-аномалия в воде ручьев и озер свидетельствует о естественном выщелачивании горных пород, особенно в кислых условиях и отражает состав материнских пород.

Также имеется отрицательная цериевая аномалия на всех спектрах. Установленный характер распределения растворенных форм РЗЭ в ручьях и озерах говорит о том, что формирование геохимического спектра РЗЭ определяется содержанием РЗЭ в горных породах территории водосбора. Имеющая максимум в области средних РЗЭ форма графика означает, что поверхностные воды обогащаются РЗЭ при взаимодействии с горными породами территории водосбора.

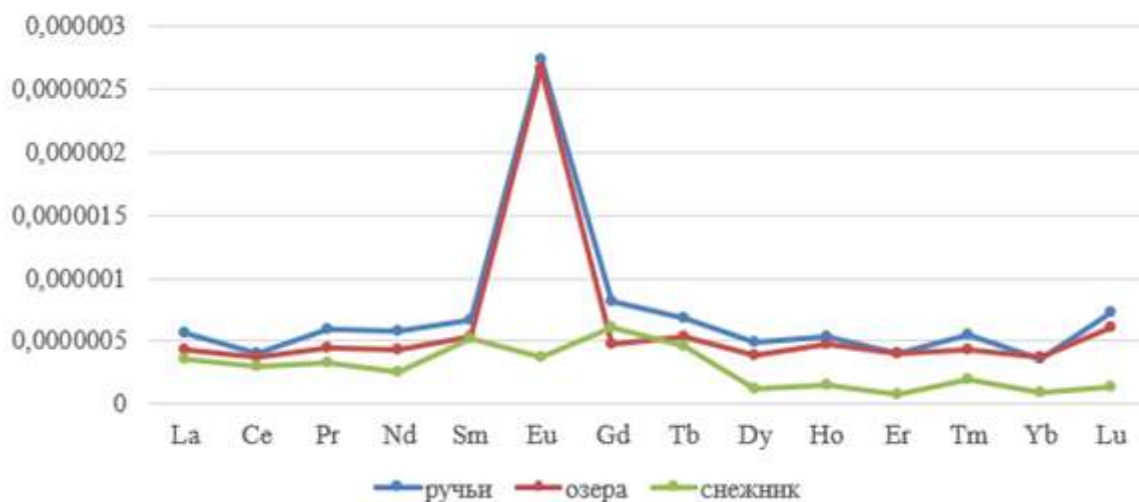


Рис. 3. Спектры РЗЭ в поверхностных водах о. Северный, нормализованные на североамериканский сланцевый композит (NASC)

Сравнение полученных концентраций в снежнике Новой Земли с снегом из Альп (Дубинин, 2006) показало одинаковые уровни концентраций (рис. 4). Обнаружена положительная Gd-аномалия на нормированных спектрах РЗЭ проб из снежника, что часто считается признаком антропогенного загрязнения (Dekker, 2024).

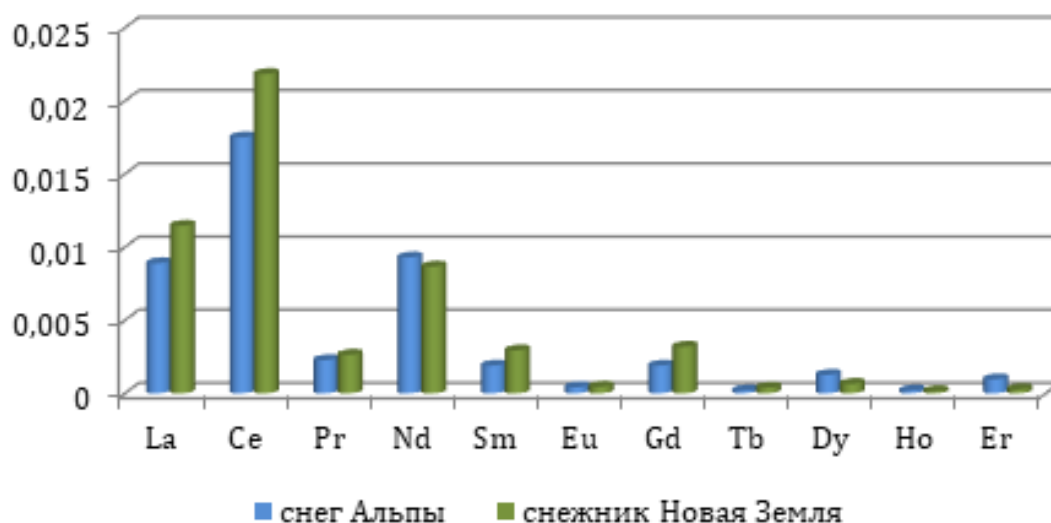


Рис. 4. Сравнение концентрации РЗЭ (в мкг/л), полученных для снега Альп (Дубинин, 2006) и снежника о. Северный

Проведенные исследования позволили определить концентрации редкоземельных элементов в поверхностных водах и снеге о. Северный арх. Новая Земля и установить следующие особенности геохимии редкоземельных элементов характерные для вод региона. Доминирование легких редкоземельных элементов (лантановая группа La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu), что типично для поступления этих элементов в поверхностные воды и затем в донные осадки в условиях холодного климата в процессе физического выветривания горных пород. Источником РЗЭ для поверхностных вод о. Северный служит разрушение горных пород ледниками и поверхностными водами. Талые воды, просачивающиеся через горные породы, вымывают РЗЭ и обогащаются тяжелыми РЗЭ. Установленные различия в спектрах РЗЭ

показывают, что РЗЭ являются природными «маркерами» для идентификации источников природных вод, что может применяться в гидрологических исследованиях.

Благодарности: авторы благодарят Русское географическое общество, Северный Морской флот и Национальный парк «Русская Арктика» за предоставленную возможность принять участие в экспедиционных работах. Отдельная благодарность Добрянскому А.С. (ИГ РАН) за прекрасную организацию полевых исследований. Работа выполнена в рамках Государственного задания Института географии РАН FMWS-2026-0003.

Список литературы:

Архипелаг Новая Земля и Карское море: геохимия, гляциология, радиационное состояние/ под ред. М.В. Флинта. М.: АПР, 2018. 152 с.

Вах Е.А. Геохимия редкоземельных элементов в природных и техногенных водах юга Дальнего Востока России. М.: ДВФУ, 2014. 160 с.

Дубинин А. В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.

Dekker H.M., Stroomberg G.J., Van der Molen A.J., Prokop M. Review of strategies to reduce the contamination of the water environment by gadolinium-based contrast agents // Educational Review. 2024. Vol. 15. No. 62. DOI: 10.1186/s13244-024-01626-7

Gromet L.P., Haskin L.A., Korotev R.L., et al. The “North American Shale composite”: its compilation, major and trace element characteristics // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1984. Vol. 48. P. 2469–2482.

Savenko A.V., Savenko V.S. Trace element composition of the dissolved matter runoff of the Russian Arctic Rivers // Water. 2024. Vol. 16(4). P. 565. DOI:10.3390/w16040565

УДК 556.114.6

**МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ГОРНОЙ ЧАСТИ
РЕСПУБЛИКИ СЕВЕРНАЯ ОСЕТИЯ-АЛАНИЯ**

Дреева Ф.Р., Реутова Н.В., Реутова Т.В.

Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Нальчик, Россия, *f.dreeva@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования микроэлементного состава поверхностных вод Республики Северная Осетия-Алания. Отбор проб проводили в летний период в 2022–2025 гг. Определение содержания Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn выполнялось методом ААС. Выявлены пространственные закономерности распределения микроэлементов в поверхностных водах региона и определены возможные источники их поступления.

Ключевые слова: бассейн р. Терек, горные реки, микроэлементный состав, пространственное распределение

Исследование содержания микроэлементов (МЭ) в поверхностных водах горных районов Кавказа имеет важное фундаментальное и прикладное значение, которое определяется как влиянием отдельных факторов на формирование состава поверхностных вод в районах со сложным геологическим строением, так и использованием большого количества водных объектов в качестве источников централизованного и нецентрализованного водоснабжения для населенных пунктов и зон рекреации, зачастую без водоподготовки и даже без подробного изучения состава. В этой связи, целью данной работы являлось изучение содержания МЭ в поверхностных водах горной части Северной Осетии-Алании для выявления пространственных закономерностей их распределения.

Рассматриваемые водные объекты относятся к бассейну р. Терек, наиболее крупные из них (реки Урух, Ардон, Фиагдон, Гизельдон и Геналдон), берут начало от ледников Главного Водораздельного и Бокового Хребтов, а в горной зоне образуют независимые бассейны, что позволяет определить влияние отдельных источников поступления МЭ на формирование состава поверхностных вод региона. Хотя реки Северной Осетии имеют относительно длительную историю изучения, исследования, как правило, были связаны с влиянием техногенных объектов (разрабатываемые месторождения и хвостохранилища) на экологическое состояние рек региона (Гурбанов и др., 2020; Дзодзикова, 2017) и практически не уделяли внимания изучению пространственных закономерностей распределения МЭ в поверхностных водах. В горной части РСО-Алания повсеместно распространены проявления рудных минералов (в том числе, разрабатываемые с древних времен месторождения полиметаллов) и связанные с ними геохимические аномалии (Лаврищев и др., 2011), которые оказывают значительное влияние на микроэлементный состав поверхностных вод. Кроме того, водные объекты региона испытывают влияние Казбекской вулканической области, что отражается на содержании некоторых МЭ в поверхностных водах (Реутова и др., 2024).

Отбор проб поверхностных вод (больших и малых рек, ручьев и родников) в горной зоне Северной Осетии-Алании проводили в 2022–2025 гг. в период активного таяния ледников (июль–начало сентября) в 166 пунктах (рис. 1). На наиболее крупных реках Урух, Ардон, Фиагдон и Гизельдон пробы отбирали и в зоне наклонной равнины до их слияния и/или перемешивания с водами других крупных рек из-за впадения рукавов, протоков или каналов. Определение концентраций МЭ (Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn) выполнялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией на приборе МГА-915 в соответствии с утвержденной методикой (Количественный..., 2009). В зависимости от кратности отношения средних концентраций к кларку речных вод (Гордеев, 1983), в исследуемых водах были выделены следующие уровни содержания компонентов с соответствующими границами диапазонов: пониженный (менее 0.5); фоновый (0.5–2); слабоповышенный (2–5); повышенный (5–10); высокий (10–50); экстремальный (более 50).

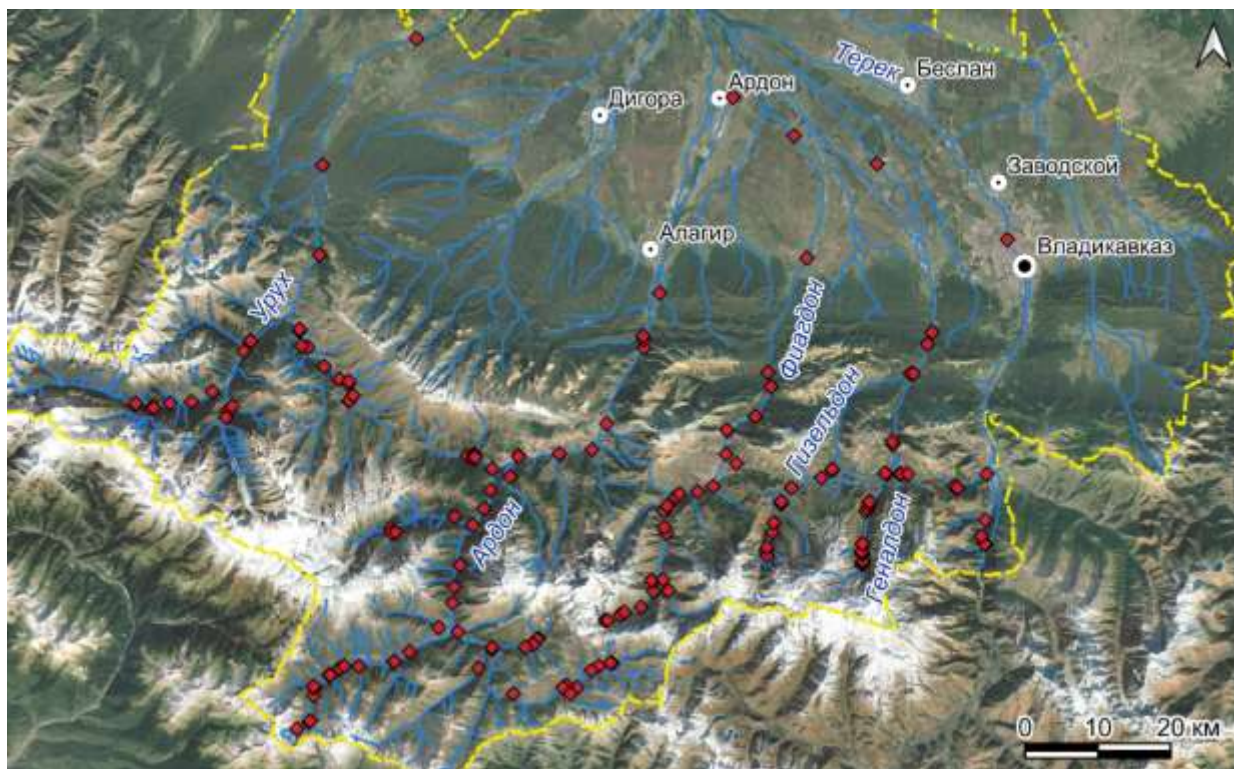


Рис. 1. Расположение пунктов отбора проб

Содержание мышьяка в водах горной части Северной Осетии в большинстве случаев соответствует пониженному или фоновому уровню (до 4 мкг/л). Концентрации мышьяка, соответствующие слабоповышенному уровню, связаны с влиянием сульфидного оруденения (р. Сонгутидон/Айгамуга, сток одной из штолен Садонского месторождения, р. Нижний Лабагом и родник в бассейне р. Цея), вулканической постройки Тепли (устья реки Лядон, верховья реки Фиагдон с левобережными притоками), или отражали влияние этих факторов на состав принимающих водотоков ниже по течению (створы на реках Фиагдон и Ардон). Повышенный уровень содержания As отмечался только в реках и родниках на склонах массива Тепли (верхние створы на р. Лядон; створ на 10-м км р. Бугультадон и родник у подножия северо-восточного отрога г. Тепли в верховьях р. Фиагдон). К этой зоне относится и объект, в котором была отмечена максимальная концентрация As (21.2 мкг/л) – мощный поток, который пробивается через рыхлые отложения у южного подножия г. Тепли в непосредственной близости от Хилакских источников.

Алюминий в исследуемых водах также содержится в относительно небольших количествах, лишь в 1/4 проб его концентрации превышают среднее содержание в речных водах. Выше фонового уровня (>2 кларков речных вод) концентрации в 10% пунктов наблюдений, причем все они расположены на водных объектах в зоне влияния Казбекской вулканической области: на реке Лядон и ее притоках на южном склоне вулканической постройки Тепли, на притоках р. Геналдон на северном склоне Казбека. Максимальная для региона концентрация Al (384.8 мкг/л) была отмечена в одном из левых притоков р. Геналдон.

Концентрации молибдена выше фонового уровня содержания отмечались только в 3 створах, каждая из которых относится к разным уровням содержания. В левом притоке р. Урух – р. Сури – слабоповышенный (2.7 мкг/л), а повышенный (8.3 мкг/л) – в одном из карстовых родников (родн. Кармсуадон или вdp. Каскадный) в осевой зоне Скалистого хребта, для которых типичны относительно высокие концентрации Mo (Реутова и др., 2020). Наибольшая концентрация Mo (16.4 мкг/л) была определена в роднике на левом берегу р. Фиагдон на 18-м км, где так же были отмечено повышенное содержание As. Выше по склону над этим родником

находится штольня, и, хотя поверхностного стока из нее не наблюдается, возможно, существует подземный сток, который и выходит на поверхность у подножия склона.

Наибольшие концентрации свинца, которые отмечены в 4 пунктах, незначительно превышают фоновый уровень (2.2 мкг/л), что позволяет говорить о равномерном распределении свинца в поверхностных водах региона, несмотря на наличие возможных источников поступления этого элемента (месторождения, хвостохранилища, сток из штолен и т. д.). Возможно, это связано с условиями миграции Pb, и этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Лидерами по содержанию цинка закономерно оказались водные объекты, связанные с добычей и переработкой полиметаллических руд: р. Ханикомдон в бассейне р. Фиагдон, в долине которой расположено хвостохранилище Фиагдонской обогатительной фабрики (149 и 128 мкг/л в створах выше и ниже хвостохранилища), а также в стоках дренажных вод из штолен в поселках Мизур – 108.3 мкг/л – и Садон – 403.6 мкг/л, что является максимальным значением для изученных нами вод. На фоне относительного обогащения исследуемых вод цинком (более 50% створов со слабоповышенным уровнем содержания), которое объясняется существующими геохимическими аномалиями, вызывает интерес относительно низкое содержание Zn в бассейне крупного правого притока р. Урух – р. Сонгутидон, где располагается фансальская группа свинцово-цинковых месторождений, разработка которых велась уже с конца XIX века.

Пониженный уровень содержания оказался характерен и для меди, несмотря на наличие малых месторождений и проявлений медных руд. Лишь в 2 створах концентрации Cu превышают средний уровень содержания в речных водах: в зоне истока р. Бугультадон/Фиагдон (16.7 мкг/л – слабоповышенный уровень) и в устье р. Геналдон (32.5 мкг/л) из-за единичного высокого значения концентрации Cu (93 мкг/л), которое можно отнести к выбросам, так как в остальных случаях концентрации Cu не превышали 3 мкг/л.

Хром также относится к микроэлементам с низким содержанием в поверхностных водах Северной Осетии–Алании. Лишь в двух родниках, расположенных в теснине ущелья р. Геналдон и в верховьях бассейна р. Фиагдон, концентрации были выше кларка речных водах, но не выходили за верхнюю границу фонового уровня содержания. В числе пространственных закономерностей следует указать, что если в бассейнах рек, которые берут начало на склонах Казбека или его отрогах, концентрации Cr находятся на фоновом уровне, то в бассейнах рек Урух и Ардон воды обеднены хромом (<0.5 кларков речных вод).

На фоне пониженного и фонового уровня содержания марганца в поверхностных водах исследуемой территории сильно выделяются водные объекты с наибольшими концентрациями марганца, которые соответствуют уровням от слабоповышенного до высокого. Почти они относятся к числу ледниковых рек, формирующихся на склонах Казбека и его отрогах, так же, как и створы с максимальными значениями концентраций Mn из числа «фоновых». Исключение составил створ на р. Ханикомдон ниже хвостохранилища (156.6 мкг/л). Высокое содержание Mn в верхнем створе на р. Геналдон объясняется наличием в зоне истока выходов термальных углекислых вод, известных как «Верхние Кармадонские ванны», которые считаются проявлением затухающей деятельности Казбекского вулканического центра и используются в качестве «дикого» бальнеологического курорта.

Наибольшие концентрации никеля также оказались характерны для р. Геналдон и ее притоков в зоне истока, для уже упомянутого створа на р. Ханикомдон, что позволяет сделать вывод о общем с Mn источнике поступления и одинаковых условиях миграции. В прочих случаях концентрации Ni можно отнести к пониженному и фоновому уровням содержания.

Содержание кадмия в ряде створов превышало уровень среднего содержания в речных водах. Однако из-за того, что определяемые значения близки к нижнему пределу определения, высока вероятность погрешностей, что не позволяет делать однозначных выводов о наличии пространственных закономерностей. Следует упомянуть только о стабильно высоком (4.8 мкг/л) уровне содержания кадмия в стоке дренажных вод из штольни в поселке Садон, что никак не отражается на содержании кадмия в водах принимающих водотоков. Вызывает

беспокойство использование данного водотока населением поселка Садон в качестве одного из источников водоснабжения для хозяйственно-бытовых целей, в которых ПДК кадмия составляет 1 мкл/л.

Концентрации серебра, так же, как и концентрации кадмия, оказались близки к нижней границе предела определения и соответствовали уровням «пониженный» и «фоновый». Максимальный уровень содержания отмечен в р. Ханикомдон (0.9 мкг/л) ниже хвостохранилища.

Полученные данные о содержании микроэлементов в поверхностных водах горной зоны Северной Осетии–Алании и выявленные пространственные закономерности позволяют говорить, что сильнее всего проявляются гидрохимические аномалии, вызванные влиянием Казбекской вулканической области. Среди объектов с относительно высоким содержанием сразу нескольких микроэлементов можно выделить два водных объекта, которые испытывают антропогенную нагрузку – сток из штольни в поселке Садон (As, Mo, Zn, Cd) и р. Ханикомдон (Al, Mn, Ni, Zn, Cd, Ag), но они не оказывают значительного влияния на состав вод принимающих рек ниже по течению ввиду маловодности. Вопрос пониженного уровня содержания свинца, меди и цинка на фоне имеющихся в рассматриваемой зоне месторождений и широко распространенных проявлений рудных минералов требует дальнейшего изучения.

Список литературы:

- Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
- Гурбанов А. Г., Лексин А. Б., Газеев В. М. и др. Экологическое состояние вод реки Ардон и оценка последствий их загрязняющего воздействия на воды реки Терек – объекта рыбохозяйственного значения I категории // Вестник Владикавказского научного центра. 2020. Т. 20. № 1. С. 50–61. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.56948
- Дзодзикова М. Э. Ретроспективный анализ химического состояния вод в руслах рек Ардон и Фиагдон в Северной Осетии // Развитие регионов в XXI веке: Материалы II Международной научной конференции, Владикавказ, 06–07 октября 2017 года / Под общ. редакцией А. У. Огоева. Владикавказ: Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова, 2017. С. 354–356.
- Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций Al, Ba, Be, V, Fe, Cd, Co, Li, Mn, Cu, Mo, As, Ni, Pb, Se, Ag, Sr, Ti, Cr, Zn в пробах природных и сточных вод атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией с использованием атомно-абсорбционного спектрометра модификаций МГА-915, МГА-915М, МГА-915МД. ПНД Ф 14.1:2.253-09. (М 01-46-2013). М. 2009. 36 с.
- Лаврищев В. А., Шейков А. А., Андреев В. М., Семенов В. М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Скифская. Лист К–37 (Сочи), К–38 (Махачкала), К–39. Объяснительная записка. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 431 с.
- Реутова Н. В., Реутова Т. В., Дреева Ф. Р. Сравнительная характеристика содержания алюминия и мышьяка в поверхностных водах Эльбрусского и Казбекского вулканических центров // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14. № 2. С. 231–243. DOI: 10.46698/VNC.2024.80.62.018
- Реутова Т. В., Дреева Ф. Р., Реутова Н. В. Сравнительная гидрохимическая характеристика водных объектов карстового происхождения в Кабардино-Балкарской Республике // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 5(97). С. 127–135. DOI: 10.35330/1991-6639-2020-5-97-127-135

УДК 550.461

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В ЭПИФИТОВЗВЕСИ НА УСТЬЕВОМ ВЗМОРЬЕ ВОЛГИ

Дубровская Т.В., Лычагин М.Ю.

dtv97@yandex.ru

Московский государственный университет, Москва, Россия

Аннотация. В дельте Волги изучено влияние высших водных растений на накопление тяжелых металлов и металлоидов во взвеси, осаждающейся на их поверхности (эпифитовзвеси). Работа основана на результатах полевых исследований, проведенных в 2017–2018 гг. на территории Дамчикского и Обжоровского участков Астраханского биосферного заповедника, расположенных у морского края дельты Волги. Проанализированы концентрации ТММ в различных компонентах аквальных ландшафтов, определены массы взвеси, накапливающейся на водных растениях, рассчитаны коэффициенты концентрации (КК) и коэффициенты обогащения (ЕФ) ТММ. Показано, что сильнее всего ТММ накапливаются в эпифитовзвеси, осаждающейся на водных растениях с плавающими листьями. Максимальное накопление взвеси (по массе) характерно для погруженных высших водных растений. Для оценки антропогенного воздействия на водные объекты целесообразно использовать коэффициент обогащения взвеси. По значениям ЕФ выделяется антропогенная ассоциация элементов: Cd-Zn-Pb-Mn-As-Sb.

Ключевые слова: геохимия, взвешенное вещество, растворенное вещество, высшие водные растения, загрязнение, тяжелые металлы и металлоиды, дельта Волги.

В последние десятилетия усиливается техногенное воздействие на окружающую среду в крупных речных бассейнах, расположенных на территории России и сопредельных государств. Загрязняющие вещества, поступающие в реки в растворенных и взвешенных формах, могут мигрировать на значительные расстояния вплоть до дельт рек, где происходит их осаждение на геохимических барьерах и в барьерных зонах. Выявление особенностей формирования и функционирования геохимических барьерных зон в крупных речных дельтах имеет важное значение для анализа современной обстановки и прогноза эколого-геохимического состояния приемных водоемов.

Для большинства рек мира изменение форм миграции химических элементов в геохимической барьерной зоне река–море обусловлено главным образом резким ростом солености воды в зоне смешения речных и морских вод. Особенностью дельты Волги является наличие обширного пресноводного устьевоего взморья, протягивающегося на десятки километров от морского края дельты, вследствие чего зона смешения выдвинута далеко в море, морские воды влияния на дельту практически не оказывают, и основными факторами, влияющими на аккумуляцию химических элементов в аквальных ландшафтах, являются изменение гидродинамических условий и водная растительность. Роль этих факторов особенно велика на отмелем устьевом взморье, значительная часть которого в летний период покрыта зарослями макрофитов.

Географический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова с начала 1990-х гг. проводит эколого-геохимические исследования в дельте Волги, направленные на оценку уровней и пространственно-временной изменчивости содержаний тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в компонентах аквальных систем, анализ форм миграции химических элементов, количественную характеристику потоков ТММ в дельте (Лычагин и др., 2011; Lychagin et al., 2015; Касимов и др., 2016; и др.). В 2017–2018 гг. были изучены особенности аккумуляции ТММ в нижней части дельты и на устьевом взморье под влиянием высших водных растений.

Объектами исследования явились два участка Астраханского биосферного заповедника: Дамчикский и Обжоровский, расположенные в системе Старой Волги и системе Бузана, соответственно. В ходе работ было отобрано 80 проб высших водных растений для

определения содержания ТММ в сухом веществе растений и 80 проб взвеси, накапливающейся на их поверхности, 53 пробы речной воды для определения содержания растворенных и взвешенных форм элементов. Для выделения взвешенного вещества пробы воды фильтровались на вакуумной установке Millipore через мембранные фильтры с размером пор 0.45 мкм. Пробы растений взвешивались в лаборатории, отмывались дистиллированной водой, высушивались в сушильном шкафу при температуре 60°C и снова взвешивались. Полученная при отмывании растений жидкость выпаривалась на песчаной бане до получения порошка сухого вещества – взвеси, осаждающейся на поверхности растений. Содержание ТММ определялось во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС) методами ICP-MS и ICP-AES. Обработка данных производилась с использованием геоинформационного, геохимического, статистического и сравнительно-географического метода.

При оценке роли речных дельт как биофильтров на пути потоков веществ природного и антропогенного происхождения большой интерес вызывает накопление взвешенных частиц на поверхности водных растений. Е. П. Янин предложил термин «эпифитовзвесь» для обозначения взвешенного вещества, осаждаемого на водных растениях (1999, 2002). Отмечено, что изучение химического состава эпифитоввзвеси позволяет эффективно оценивать техногенное воздействие на водные объекты.

Эпифитовзвесь состоит из минеральных частиц разной крупности, в основном мелкодисперсных, а также из органических частиц, таких как остатки самих растений и др. организмов (детрит). Высшие водные растения играют роль «ловушек» для взвешенного вещества, приносимого речным потоком. Количество эпифитоввзвеси, осаждаемой растениями, зависит от морфологического строения растений и условий произрастания. Растения с тонкими рассеченными листьями (роголистник погруженный, уруть сибирская, сальвиния плавающая) накапливают больше эпифитоввзвеси, чем растения с толстыми плотными листьями без «ворсинок» (лотос орехоносный, нимфейник щитолистный, кубышка желтая и др.). Накопление взвеси погруженными растениями, произрастающими в толще воды (роголистник погруженный, рдест пронзеннолистный и др.) идет активнее, нежели у растений с тонким стеблем и плавающими листьями (рдест плавающий, кубышка желтая, лотос орехоносный и др.). На роголистнике погруженном, урути сибирской, рдесте пронзеннолистном, сальвинии плавающей, чилиме (рогольнике астраханском), рдесте гребенчатом накапливается значительная масса взвешенных веществ вне зависимости от местоположения, будь то выход из протоки или же ее срединная часть. Наименьшее количество (по массе) взвеси было смыто с лотоса орехоносного и узколистных гидрофитов. Нимфейник щитолистный и кубышка желтая по массе накопления эпифитоввзвеси ближе к гидрофитам.

Анализ полученных данных показал, что в нижней части дельты Волги в эпифитоввзвеси накапливаются Fe, Mn, Cr, Ni, V, Cr, Cu, Mo, W и U. Разброс между максимальными и минимальными содержаниями для большинства элементов составляет от 6 до 10 раз, для Mn – 16–19, Sn – 25, W – 70 раз. Для Mn большие различия объясняются подвижностью этого элемента в речных водах и его высокой биофильностью, для Sn и W могут быть связаны с техногенным воздействием на аквальные ландшафты.

Для оценки содержаний ТММ в эпифитоввзвеси были рассчитаны кларки концентрации (КК) по отношению к содержаниям ТММ в литосфере по (Rudnick, Gao, 2014). Наибольшие кларки концентрации в эпифитоввзвеси дельты Волги выявлены для Cd и Mn. Концентрации других элементов превышают кларки не более, чем в 2 раза.

Коэффициент обогащения EF (Enrichment Factor) рассматривается нами как показатель антропогенного поступления ТММ. Была проведена оценка интенсивности обогащения эпифитоввзвеси ТММ для Дамчикского участка Астраханского заповедника (рис. 1). Использовались градации, принятые для донных осадков (Birch et al, 2020): <1.5 – необогащенные, 1.5–3 – слегка обогащенные, 3–5 – умеренно обогащенные, 5–10 – значительно обогащенные, 10–25 – сильно обогащенные, >25 – чрезвычайно обогащенные.

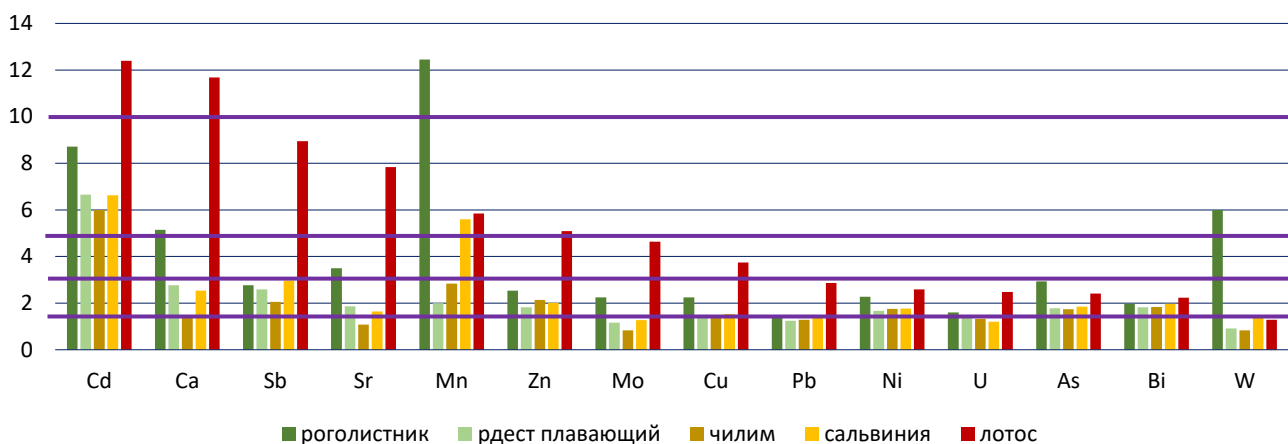


Рис. 1. Коэффициент обогащения эпифитоввзвеси. Дамчикский участок Астраханского заповедника, 2018 г.

Анализ показал, что эпифитоввзвесь со всех исследуемых растений, особенно лотоса орехоносного, наиболее обогащена Cd, роголистника погруженного – Mn. По-видимому, на плавающих листьях лотоса накапливается взвесь более тонкая по гранулометрическому составу. Более крупная взвесь перемещается в толще воды и в придонном слое, поэтому у роголистника погруженного значения EF ниже.

Выводы. Количество эпифитоввзвеси, осаждаемой растениями, зависит от морфологического строения растений и условий произрастания. Максимальное накопление взвеси характерно для погруженных высших водных растений.

Средние содержания элементов во взвеси с макрофитов в целом близки кларкам литосферы. Наибольшие кларки концентрации выявлены для Cd и Mn, слабее накапливаются V, Cr, Cu. Интенсивнее всего ТММ накапливаются во взвеси на водных растениях с плавающими листьями.

Для оценки антропогенного воздействия на водные объекты целесообразно использовать коэффициент обогащения. По значениям EF в эпифитоввзвеси выделяется ассоциация элементов Cd, Sb, Mn, Zn, Mo. Аналогичные ассоциации характерны для затронутых антропогенным воздействием городских почв и дорожной пыли (Kasimov et al., 2025), что указывает на общность источников загрязнителей.

Благодарности: работа выполнена в рамках гранта РГО-РФФИ «Геохимические барьерные зоны в пресноводных дельтах рек России» и в рамках государственного задания МГУ им. М. В. Ломоносова.

Список литературы:

- Касимов Н.С., Касатенкова М.С., Ткаченко А.Н., Лычагин М.Ю., Крооненберг С.Б. Геохимия лагунно-маршевых и дельтовых ландшафтов Прикаспия. 100 лет со дня рождения А. И. Перельмана. М.: Лига-Вент, 2016. 244 с.
- Лычагин М.Ю., Касимов Н.С., Курьякова А.Н., Крооненберг С.Б. Геохимические особенности аквальных ландшафтов дельты Волги // Известия РАН. Серия географическая. 2011. № 1. С. 100–113.
- Янин Е.П. Эпифитоввзвесь – индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами // Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 6. С. 731–734.

- Янин Е.П. Эпифитовзвесь – новый индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами. – М.: ИМГРЭ, 2002. 51 с.
- Birch G., Lee H., Tanner E. et al. Sediment metal enrichment and ecological risk assessment of ten ports and estuaries in the World Harbours Project // Marine Pollution Bulletin. 2020. Vol. 155. P. 1–23.
- Lychagin M.Yu., Tkachenko A.N., Kasimov N.S., Kroonenberg S.B. Heavy metals in the water, plants, and bottom sediments of the Volga River mouth area // Journal of Coastal Research. 2015. Vol. 31(4). P. 859–868.
- Kasimov N.S., Vasil'chuk J.Yu., Tereshina M.A., Chalov S.R., Erina O.N., Kosheleva N.E., Shinkareva G., Sokolov D.I., Vlasov D., Konoplev A.V. Metals and metalloids pollution levels, partitioning, and sources in the environmental compartments of a small urban catchment in Moscow megacity // Environmental Pollution. 2025. Vol. 367. 125552. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.125552
- Rudnick R. L., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. 2nd ed. / ed. by H. D. Holland, K. K. Turekian. Amsterdam : Elsevier, 2014. Vol. 4. P. 1–51.
- Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database // Sci. Total Environ. 2009. pp. 853–868.

УДК 502.175

ВЛИЯНИЕ ЛЕКАРСТВЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Козлова М.А.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, *mblshok@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрена проблема лекарственного загрязнения природных и сточных вод. Показано, что традиционные методы очистки вод от такого загрязнения малоэффективны ввиду того, что лекарства зачастую представляют собой сложные по структуре химические соединения, которые практически не поддаются биodeградации. Предложены некоторые меры, направленные на снижение поступления лекарств в водную среду.

Ключевые слова: лекарственное загрязнение, мероприятия, очистка вод, уменьшение ущерба.

Несмотря на то, что проблема лекарственного загрязнения поверхностных и сточных вод была поднята в зарубежных странах еще во второй половине 20 в., подобные исследования в России до сих пор практически не проводятся.

Как известно, основными источниками загрязнения являются:

- недостаточно очищенные бытовые стоки,
- сельское хозяйство как активный потребитель ветеринарных препаратов, стимуляторов роста и пр.,
- медицинские учреждения при неправильной утилизации медотходов и как место, где сосредоточены «потребители» лекарств,
- промышленные сбросы с фармпроизводств,
- некоторые другие источники.

Многие современные очистные станции не рассчитаны на полное удаление сложных химических соединений, к которым относятся и лекарства. Сами по себе сточные воды – это многокомпонентная смесь, содержащая огромное количество загрязняющих веществ в абсолютно разных концентрациях. Тогда как лекарственные вещества (ЛВ) часто содержатся в воде в довольно низких концентрациях, зачастую в диапазоне микрограмм и наногамм в литре. Такое соотношение может приводить к конкуренции между различными органическими соединениями за сорбцию и окислители. В этой ситуации вещества с большим содержанием имеют в этой борьбе преимущество. Кроме того, ЛВ довольно часто оказываются устойчивыми к биodeградации, что приводит к невозможности их удаления традиционными методами очистки с использованием активного ила.

Процесс активного ила является стандартным методом вторичной очистки на муниципальных очистных сооружениях, однако его эффективность в удалении ЛВ варьируется в зависимости от типа соединения, т.е. от его химической структуры. Основные механизмы удаления этим методом включают микробную деградацию, адсорбцию на биомассе и гидролиз. Эффективность удаления ЛВ этим методом составляет 10–90% для различных соединений, но остается крайне непостоянной (Joss et al., 2006; Vasudha, Laiju, 2024; Verlicchi et al., 2012). Например, карбамазепин, один из наиболее распространенных антиконвульсантов, практически не удаляется такими методами и используется в качестве маркера загрязнения сточных вод (Hai et al., 2018). Карбамазепин имеет сложную гетероциклическую структуру (трициклическое соединение с азотсодержащими группами). Эта структура является для большинства микроорганизмов активного ила чужеродной и трудноразрушимой. В природе не существует эволюционно привычных ферментов (энзимов), которые могли бы эффективно «расщепить» такую искусственную молекулу. При этом в стандартном активном иле, адаптированном к бытовым стокам, практически нет бактерий или грибов, способных использовать карбамазепин как источник углерода или энергии.

В высоких концентрациях, что редко бывает в коммунальных стоках, но возможно в промышленных, карбамазепин может оказывать токсическое действие на часть микроорганизмов ила, подавляя их активность. И даже если бы деградация была возможна, она протекала бы очень медленно. Гидравлическое время пребывания в аэротенке (обычно 6–12 часов) и возраст ила (среднее время жизни бактерий, несколько дней) недостаточны для запуска и протекания необходимых биохимических реакций. Все это делает карбамазепин практически не удаляемым из воды активным илом.

Высокой удаляемостью (>80%) характеризуются легко биodeградируемые вещества (например, ибупрофен, парацетамол, некоторые бета-блокаторы). Удаление этих веществ происходит благодаря сочетанию нескольких ключевых факторов. Так, молекула парацетамола относительно проста. Она содержит две функциональные группы, которые микроорганизмы активного ила «узнают» и для которых у них есть инструменты (ферменты). Процесс разложения парацетамола хорошо изучен. При этом условия в системе активного ила идеально подходят для разложения подобных соединений — это аэробная среда, достаточное время и возможная адаптация микроорганизмов. Ключевые ферменты (оксигеназы) для разложения ароматических колец требуют наличия кислорода, которого достаточно в аэротенках. Процессы гидролиза и окисления протекают относительно быстро по сравнению с периодом гидравлического пребывания воды в системе (те самые 6–12 часов). Поскольку парацетамол поступает в канализацию постоянно и в значительных количествах, микробное сообщество ила постоянно «тренируется» на нем, поддерживая популяцию бактерий, способных его утилизировать.

Таким образом, парацетамол хорошо удаляется активным илом, потому что его молекула химически «уязвима» стандартными бактериальными ферментами (амидазами, оксигеназами) в аэробных условиях. Это биоразлагаемое соединение, в то время как карбамазепин — рефрактерное (устойчивое). То есть, эффективность очистки воды от конкретного ЛВ напрямую зависит от его молекулярной структуры и свойств.

Анализ литературы (см., например (Wang et al., 2018; Loganathan et al., 2023; Zhang et al., 2008)) показал, что не существует универсального метода удаления всех фармацевтических соединений из сточных вод благодаря их разнообразным физико-химическим свойствам (полярность, гидрофобность, наличие функциональных групп). Однако комбинирование различных методов позволяет достичь очень высокой эффективности удаления (>95%) при одновременном управлении затратами. Мембранные технологии (особенно обратный осмос) демонстрируют наивысшую надежность очистки воды, эффективные окислительные процессы предпочтительны для полной минерализации устойчивых загрязнителей, а природные системы вроде фитоочистных сооружений предлагают наиболее экономически целесообразные долгосрочные решения при наличии земельных ресурсов. В табл. 1 обобщены наиболее изученные технологии водоочистки.

Попадая в водную среду в зависимости от своих физико-химических свойств, а также от факторов среды, ЛВ подвергаются, в первую очередь, перераспределению между водой, донными отложениями и взвесью, а затем трансформируются и деградируют до более простых соединений. Однако, многие лекарства по своей структуре представляют собой стабильные, плохо подвергающиеся разрушению соединения, которые могут накапливаться в водной среде, а также в биоте, оказывая на них постоянное воздействие.

Хорошо изучено влияние антибиотиков на развитие и распространение устойчивости к антимикробным препаратам (антибиотикорезистентности) среди бактерий в окружающей среде. Это создает «резервуар» генов устойчивости, которые могут передаваться патогенным бактериям. Гормональные препараты могут вызывать феминизацию (появление женских половых признаков) у самцов рыб, амфибий и моллюсков, нарушать репродуктивные функции, приводить к снижению популяций, а антидепрессанты способны менять поведение рыб — снижать инстинкт самосохранения и нарушать естественные модели питания.

Таблица 1. Эффективность удаления ЛВ основными методами очистки воды.

Технология	Диапазон удаления (%)	Основные механизмы	Основные ограничения
Конвенциональный активный ил	40–100 (высокая вариативность)	Микробная деградация, адсорбция на биомассе	Низкая эффективность для устойчивых соединений (карбамазепин часто <50%)
Мембранный биореактор	70–95	Биодеградация, мембранное разделение	Обрастание мембран, требуется регулярная химическая очистка
Активированный уголь	75–95+	Гидрофобные взаимодействия, электростатическое взаимодействие	Вариативность в зависимости от гидрофобности/заряда соединения, требуется регенерация
Нанофильтрация	84–98	Исключение по размерам, электростатическое отталкивание, адсорбция	Обрастание мембран, обработка концентратов, высокое энергопотребление
Обратный осмос	95–99+	Исключение по размерам	Высокое энергопотребление, высокие капитальные и эксплуатационные затраты, обработка концентратов
Озонирование	34–100 (в зависимости от соединения)	Гидроксил-радикальное окисление	Конкуренция органического углерода за радикалы, образование токсичных побочных продуктов
Процесс Фентона	80–99+	Гидроксил- и сульфат-радикальное окисление	Узкий диапазон pH, образование железного осадка, образование побочных продуктов
УФ/H ₂ O ₂	70–95+	Прямая фотолиз и гидроксил-радикальное окисление	Высокое энергопотребление, неэффективен для некоторых соединений (карбамазепин)
Фотокатализ (TiO ₂)	68–99+	Генерация электронно-дырочных пар, радикальное окисление	Требуется УФ-облучения, неэффективен в мутной воде, требует разделения частиц катализатора
Фитоочистные сооружения	21–99	Микробная деградация, адсорбция, растительное поглощение	Требуется больших площадей земли, зависит от температуры и сезона, менее эффективен для устойчивых соединений

Хотя концентрации лекарств в питьевой воде, как правило, крайне малы (нано- и микрограммы на литр), существует неизученный риск хронического воздействия «коктейля» из десятков различных препаратов на протяжении всей жизни человека. Потенциальные риски также включают аллергические реакции, нарушение работы эндокринной системы, возможное влияние на развитие антибиотикорезистентности у человека.

В какой-то степени способствовать уменьшению поступления ЛВ в водную среду могут некоторые мероприятия, среди которых можно выделить усовершенствование очистных сооружений, включая внедрение технологий озонирования, мембранной фильтрации, обработки активированным углем. Этому также будет способствовать правильная утилизация ЛВ среди населения, подразумевающая прием просроченных лекарств аптеками, как это уже реализовано в некоторых странах за счет отдельных федеральных программ. Кроме того, можно рекомендовать разрабатывать такие ЛВ, которые легче разлагаются в окружающей среде после выполнения своей функции, а также ввести нормы

предельно допустимых концентраций для наиболее опасных фармацевтических веществ в воде и мониторинг их содержания.

Последнее предложение в некоторой степени реализовано после введения в 2021 г. нового СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», который утвердил ПДК для 11 веществ, являющимися зарегистрированными лекарственными препаратами. Однако, кардинально ситуацию это не изменило, поскольку до сих пор не понятно, какими методиками и в каких лабораториях возможно определение таких концентраций ЛВ (например, определение 17-альфа-этинилэстрадиола в концентрации 0.035 нг/л).

В целом мероприятия по минимизации ущербов от лекарственного загрязнения не всегда могут основываться только на методах снижения нагрузки на водоем и поступления соответствующих загрязняющих веществ. Зачастую процессы, протекающие в водном объекте, при определенных условиях могут также значительно снизить содержание веществ за счет интенсификации самоочищения водоема.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы:

- Hai F.I., Yang S., Asif M.B. et al. Carbamazepine as a Possible Anthropogenic Marker in Water: Occurrences, Toxicological Effects, Regulations and Removal by Wastewater Treatment Technologies // *Water*. 2018. Vol. 10(2). 107. DOI: 10.3390/w10020107.
- Joss A., Zabczynski S., Göbel A. et al. Biological degradation of pharmaceuticals in municipal wastewater treatment: Proposing a classification scheme // *Water Research*. 2006. Vol. 40. Is. 8. P. 1686–1696. DOI: 10.1016/j.watres.2006.02.014.
- Loganathan P., Vigneswaran S., Kandasamy J. et al. Treatment Trends and Combined Methods in Removing Pharmaceuticals and Personal Care Products from Wastewater—A Review // *Membranes (Basel)*. 2023. Vol. 13(2):158. DOI: 10.3390/membranes13020158.
- Vasudha V., Laiju A.R. A Sustainable Approach Towards Wastewater Treatment in Pharmaceutical Industry: A Review // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2024. 1326. 012137. DOI:10.1088/1755-1315/1326/1/012137.
- Verlicchi P., Aukidy M. Al, Zambello E. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—A review // *Science of The Total Environment*. 2012. Vol. 429. P. 123-155. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.028.
- Wang Y., Wang X., Li M. et al. Removal of Pharmaceutical and Personal Care Products (PPCPs) from Municipal Waste Water with Integrated Membrane Systems, MBR-RO/NF // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018. Vol. 15. 269. DOI: 10.3390/ijerph15020269.
- Zhang Y. et al. Removal of pharmaceuticals and personal care products in municipal wastewater treatment plants // *Water Environment Research*. 2008. Vol. 80(11). P. 2115–2125. DOI: 10.2166/wst.2014.145

УДК 579.68; 579.26

**МИКРОБНЫЕ КОМПЛЕКСЫ АЛЬГОБАКТЕРИАЛЬНЫХ И БЕНТОСНЫХ
СООБЩЕСТВ ОЗЕР ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА**

Кутузова И.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, *kutuzovaia@my.msu.ru*

Аннотация. В работе отражены результаты анализа микробных сообществ нескольких антарктических озер на территории оазиса Холмы Ларсеманн. Метагеномный анализ образцов альгобактериальных матов и бентосных отложений из девяти водных объектов оазиса показал высокое разнообразие функциональных групп прокариот, коррелирующее с гидрохимическим составом озер и удаленностью от зон антропогенного воздействия. В изученных образцах доминирующим являлся филум *Pseudomonadota*, субдоминантами являлись филумы *Bacillota*, *Chloroflexota*, *Bacteroidota*, *Actinomycetota* и *Cyanobacteriota*. В составе микробных сообществ некоторых озер были выявлены группы бактерий, ассоциированные с человеком и птицами, а также функциональные группы прокариот, связанные с процессами адаптации к антропогенным загрязнениям.

Ключевые слова: Антарктида, альгобактериальные маты, микробные сообщества озер, экология полярных экосистем

В экстремальных условиях материковой Антарктиды именно микробные сообщества становятся основными образователями экосистем антарктических биотопов. Наземная и озерная флора антарктических оазисов (территорий, свободных от ледникового покрова) отличается значительным разнообразием, однако основу ее по-прежнему составляют микробные комплексы.

Изучение видового разнообразия и функциональной роли различных групп микробных сообществ антарктических экосистем представляет интерес не только с точки зрения их экологии (роли в общем биотопе), но и их способности к нивелированию последствий антропогенных загрязнений. Возрастающая антропогенная нагрузка, на фоне глобальных изменений климата, может приводить к перестройкам хрупких полярных экосистем, а также утере или снижению реликтового микробного и флористического биоразнообразия антарктических оазисов. С другой стороны, регулярные посещения региона приводят к увеличению обменного потока микробов между Антарктикой и другими регионами планеты, поэтому необходимо представлять потенциальную эпидемиологическую картину. В работах других исследователей неоднократно отмечалось, что антропогенный фактор оказывает преобладающее влияние, по сравнению с климатическим, на экологию оазисов – в виду специфики организации структуры микробных сообществ антарктических биотопов (Шаров, Толстиков, 2020; Власов и др., 2020 и др.).

Целью настоящей работы являлась оценка структуры прокариотного комплекса альгобактериальных сообществ гидрологических объектов оазиса Холмы Ларсеманн и их устойчивости к антропогенному воздействию. В качестве объектов были выбраны 9 озер полуострова Брокнес, наиболее контрастно различающихся по удаленности от зон антропогенной нагрузки и гидрохимическим параметрам (рис. 1). Основные гидрохимические параметры озер (амплитуда значений температуры воды, pH, электропроводность и окислительно-восстановительный потенциал) фиксировались на месте в течение сезона полевых работ (табл. 1). Характер антропогенного воздействия на выбранные озера: частая посещаемость – Степпед (водозаборное), Лоу (австралийско-румынская сезонная база «Law»), Прогресс (бывшее пристанционное озеро, находится на главной трассе прохода техники); редкая посещаемость – Рейд, LH-59, LSH (рабочее название); крайне редкая посещаемость (Дискашн, LH-73).

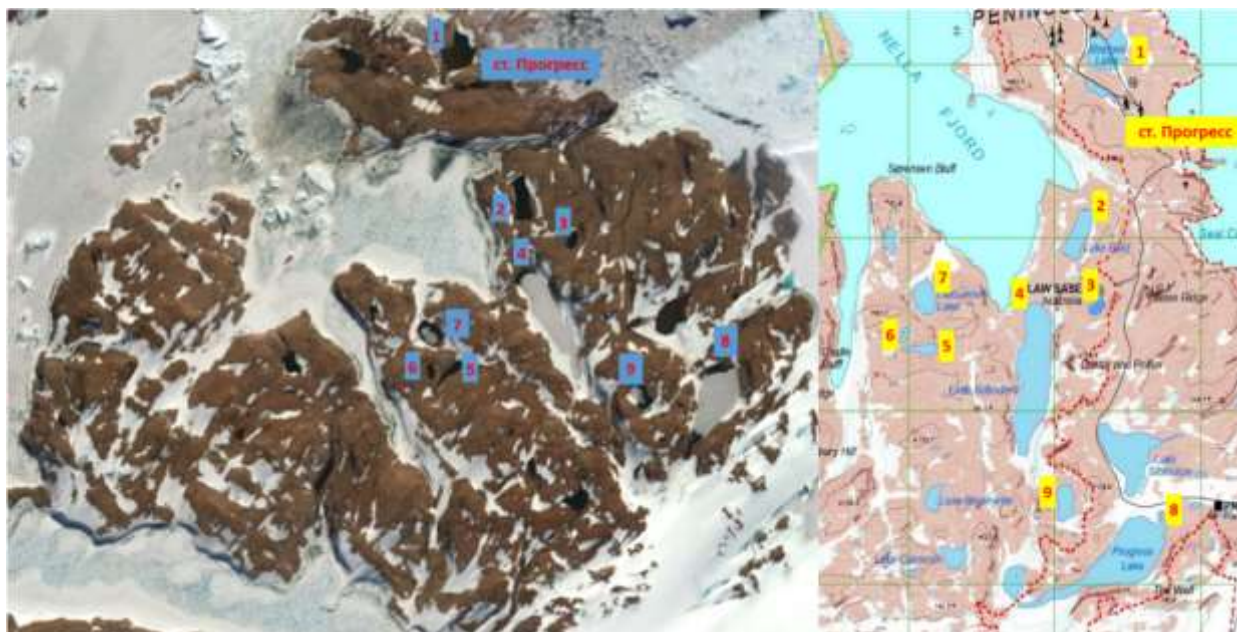


Рис. 1. Схема расположения исследованных озер полуострова Брокнес оазиса Холмы Ларсеманн (район станции Прогресс)
Озера: 1 – Степпед, 2 – Рейд, 3 – Лоу, 4 – Скандрет, 5 – LH-59, 6 – LSH, 7 – Дискашн, 8 – Прогресс, 9 – LH-73.

Таблица 1. Гидрохимические параметры исследованных озер и характер антропогенного воздействия на них.

Параметры	Степпед	Рейд	Лоу	Скандрет	Дискашн	LH-59	LSH	Прогресс	LH-73
Колебания Т, °С	1.4-8.6	1.0-9.0	1.1-8.3	2.6-7	1.2-8.5	0.8-6.9	1.0-7.4	1.0-8.6	1.3-5.7
pH	7.5	7.8	8.2	7.2	7.5	7.2	7.7	6.8	7.5
Сред. КСl, мкСм/см	702	1825	3610	142	195	178	1490	151	265
Сред. ОВП, mV	132	125	142	127	125	148	103	152	147

В ходе сезона 68-й Российской антарктической экспедиции из этих озер были отобраны образцы поверхностных альгобактериальных матов, а также прибрежных и придонных бентосных отложений. Всего было проанализировано образцов 20 образцов альгобактериальных матов и бентосных отложений из 9 озер полуострова Брокнес оазиса Холмы Ларсеманн (окрестности станции Прогресс). Анализ микробных сообществ выбранных образцов проводили методом высокопроизводительного секвенирования по гену 16S рРНК (регион V3V4) полученной тотальной ДНК. Для обработки нуклеотидных последовательностей был использован метод ASV (Amplicon Sequence Variant, Caruso et al., 2019). Таблица ASV, в которой подсчитана встречаемость каждого конкретного варианта последовательности ампликона региона V3V4 16S рРНК для каждой точки, получали с помощью пакета dada2 (v.1.34.0) была создана с помощью ПО Dadaist2 (Callahan et al., 2016). Для таксономического предсказания использовали базу данных SILVA 138 (Quast et al., 2016). Относительную представленность рассчитывали как долю присутствия таксона по отношению ко всему микробному сообществу. Далее представленность перерасчитывали до таксономического ранга род («Genus»).

Во всех исследованных образцах домен Bacteria был доминирующим прокариотным компонентом по сравнению с доменом Archaea и составлял от 99 до 100%. Полученные в результате проведенных анализов данные относительной представленности таксона уровня тип («Phylum») приведены в табл. 2. В исследованных образцах озерных микробных сообществ доминирующим являлся филум *Pseudomonadota* (син. *Proteobacteria*) – он был представлен во всех образцах (только классы альфа- и гамма-протеобактерий), его доля составляла до 93%. Субдоминантами в изученных образцах являлись филумы *Bacillota* (до 48%), *Chloroflexota* (до 32%), *Bacteroidota* (до 27%), *Actinomycetota* (до 21%) и *Cyanobacteriota* (до 20%) – их представители встречались практически во всех исследованных озерах, а соотношение варьировало в зависимости от биотопа (табл. 2).

Таблица 2. Бактериальный состав альгобактериальных матов и отложений исследованных озер.

Филумы/Озера	Степед		Рейд	Лоу		Скандрет		Дискашн		LH-59	LSH		Прогресс		LH-73
Тип образца	М	О	М	М	О	М	О	М	О	М	М	О	М	О	М
<i>Pseudomonadota</i>	57	43	93	42	86	77	27	80	21	80	13	82	88	85	68
<i>Bacillota</i>	11	42	2	30	1	2	48	3	12		73	15			
<i>Actinomycetota</i>	21	12	2	16	9	9	20	13	10	12	7		6	9	20
<i>Bacteroidota</i>			1	1					50		2				6
<i>Cyanobacteriota</i>	2	3		3	2	7	5	1	1	5	2		4	2	3
<i>Chloroflexota</i>	7		1	4		2		1	1	3				2	
Итог	98	100	99	96	98	97	100	98	95	100	97	97	98	98	97

Прим.: М – маты, О – прибрежные отложения.

Несмотря на относительную выравненность представленности таксонов на уровне филумов, на уровне рода были отмечены отличия в составе альгобактериальных и бентосных сообществ часто используемых озер по сравнению с редко посещаемыми водоемами, при аналогичных гидрохимических показателях. Наибольшие отличия между озерами были выявлены на основании анализа образцов придонных альгобактериальных матов и бентоса. Они значительно отличались от бактериальных сообществ поверхностных матов и прибрежных отложений – распределением по представленности таксонов и высоким разнообразием на уровне рода. В этих образцах были выявлены представители типов (филумов) *Thermodesulfobacteriota*, *Atribacterota*, *Gemmatimonadota*, *Acidobacteriota*, *Latescibacterota*, *Methyloirabilota*, *Nitrospirota*, *Patescibacteria*, *Planctomycetota*, *Spirochaetota* и другие (табл. 3), свидетельствующие о многообразии происходящих процессов. Предположительно, такая закономерность распределения различных функциональных групп прокариот в микробных сообществах озер связана со способностью представителей придонного комплекса и отложений активно метаболизировать (психрофилы) либо долгое время сохраняться (спорообразующие) в экстремальных условиях зимнего периода, тогда как поверхностные альгобактериальные комплексы активно формируются только в биологически активный сезон антарктического лета.

Таксономическое распределение на уровне родов и семейств выявляло значительные отличия между озерами, связанные как с гидрохимическими условиями, так и с характером и степенью антропогенного влияния. В большинстве случаев, состав доминантных и редких родов различных типов исследованных сообществ отражал естественные процессы, обусловленные гидрохимией озер, тогда как субдоминантами выступали роды, представители которых являются условно-патогенными либо свидетельствуют об адаптации сообществ к антропогенным загрязнениям с участием человека или техники.

Таблица 3. Бактериальный состав придонных альгобактериальных комплексов некоторых из исследованных озер.

Типы (филумы)/Озера	Степпед	Рейд	Лоу	Прогресс	Дискашн
<i>Pseudomonadota</i>	58	3	7	14	9
<i>Bacillota</i>	1	3	4	10	33
<i>Actinomycetota</i>	6	8	7	14	10
<i>Bacteroidota</i>	3	27	23		33
<i>Cyanobacteriota</i>	20	1	1	1	1
<i>Chloroflexota</i>	2	22	32	22	4
<i>Thermodesulfobacteriota</i>		5	8		8
<i>Atribacterota</i>		17	7		
<i>Gemmatimonadota</i>	7			4	
<i>Acidobacteriota</i>	2	3	1	16	
<i>Latescibacterota</i>		1	3	1	
<i>Methyloirabilota</i>				6	
<i>Nitrospirota</i>		3	1	3	
<i>Patescibacteria</i>		1	1	2	
<i>Spirochaetota</i>		1	1		
<i>Planctomycetota</i>		1	1	1	1
Итого	99	96	97	94	99

Степпед. Действующее водозаборное озеро. Доминирующими родами являлись *Pseudomonas* (маты и прибрежные отложения), *Clostridium sensu stricto* 5 (отложения), *Polymorphobacter* (придонные) и *Serratia* (маты). Представители последнего могут являться условно-патогенными, однако в целом представители рода имеют широкую экологическую специализацию, адаптацию к низким температурам и высокой минерализации.

Рейд. В зоне прибрежных матов и отложений выявлены бактерии рода *Yersinia*, представители которого могут являться патогенами человека и птиц, и при этом способны долгое время сохраняться при низких температурах. В придонных отложениях доминировали представители *Bacteroidetes vadinHA17* (анаэробные бактерии, часто обнаруживаемые в донных отложениях и микробных сообществах, участвующих в деградации органических загрязнений) и филума *Thermodesulfobacteriota* (анаэробные бактерии сульфат-редукторы).

Лоу. В образцах отложений абсолютным доминантом являлся род *Hafnia-Obesumbacterium* – факультативно анаэробные бактерии, часто связанные с пищевыми продуктами и брожением, некоторые представители являются условно-патогенными. В образцах матов были выявлены роды *Staphylococcus* и *Roseomonas*, представители которых часто являются патогенами человека, что коррелирует с частотой посещаемости озера. В придонных отложениях доминировали представители *Bacteroidetes vadinHA17* и бактерии, отвечающие за метаногенез и сульфат-редукцию.

Скандрет. Доминирующим родом в матах являлся род *Pseudomonas* – аэробы, распространенные в почве, пресных и морских водоемах, на растениях (в ризосфере, могут стимулировать рост) и у животных. Играют ключевую роль в разложении органики и биогеохимических циклах. В отложениях доминировал *Sporosarcina* – факультативные анаэробы, часто обитающие в почве и способные к биоминерализации и активному разложению мочевины. Нетипичным оказалось присутствие в образцах из данного озера рода *Saccharofermentans* (4%), являющегося облигатно анаэробным мезофилом и обладающего способностью сбраживать сахара (Chen S. et al., 2010).

Дискашн. Микробные сообщества этого озера отличались высоким функциональным разнообразием. Отличительной особенностью микробного комплекса данного водоема являлось доминирование в отложениях и глубоководных образцах групп бактерий,

свойственных заболоченным пресноводным водоемам, а также представителей филума *Thermodesulfobacteriota*, отвечающих за цикл серы. Важным обнаружением для данного озера является присутствие нетипичного для таких гидрохимических показателей рода *Geobacter* – железо-восстанавливающих бактерий, которые широко распространены и играют важную биогеохимическую роль в разнообразии природных сред (Lovley, 2011). В образцах поверхностных матов доминирующую позицию занимали цианобактерии и представители рода *Janthinobacterium* – психротолерантные бактерии из пресной воды, почвы и подледных сообществ, участвующие в разложении органических веществ, представители которого вырабатывают фиолетовый антимикробный пигмент виолацеин; и рода *Massilia* – аналогичных по устойчивости к низким температурам, но ассоциированных с растениями.

LH-59. Доминирующим родом являлся *Pseudomonas*. Среди интересных представителей стоит выделить род *Rhodomicrobium* – пурпурные несерные бактерии, обитающие в анаэробных, освещенных местах обитания, распространены в иле, пресноводных водоемах, прибрежных зонах и почве. Небольшая доля родов *Serratia* и *Yersinia* может являться следствием обильного гнездования снежного буревестника (*Pagodroma nivea*) в районе этого озера.

LSH. Безымянное озеро, которое, несмотря на близкое расположение с нейтральным по характеристикам озером LH-59, имело значительные отличия в микробном составе. Доминантами в поверхностных матах этого озера являлись широкая экологическая группа бактерий группы *Clostridium*, в частности *Clostridium estertheticum* – психротолерантные, облигатно-анаэробные спорообразующие бактерии, широко распространенные в почве, озерных илах, кишечнике животных и арктических экосистемах, участвуют в разложении органических веществ в анаэробных условиях, способны выживать и размножаться в неблагоприятных условиях холода и засухи, легко распространяются. В придонных сообществах доминировала группа *Acinetobacter lwoffii* – распространенные свободно живущие сапрофиты, хемоорганотрофы с окислительным метаболизмом, однако, ассоциированные с человеком.

Прогресс. В образцах матов из данного озера преобладали представители родов *Serratia* и *Yersinia*. В прибрежных илистых отложениях доминировала группа родов *Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia* – широко распространенные в почве и воде, способные к фиксации азота, некоторые представители обладают патогенностью и высокой устойчивостью к антибиотикам. Необычными обнаружением в данном озере стали представители *Ktedonobacteria* (почвенные бактерии, повышенная концентрация которых свидетельствует о загрязнении тяжелыми металлами) и филум *Methylophilum* (уникальные бактерии, играющие ключевую роль в углеродном и азотном циклах, известные способностью к анаэробному окислению метана, сопряженному с восстановлением нитритов). Полученное распределение соотносится с высокой и разнообразной антропогенной нагрузкой на данное озеро.

LH73. Здесь доминировал род *Serratia*, представленный свободноживущими таксонами, ассоциированными с растениями. В качестве субдоминантов выступали представители родов *Agromyces*, *Cryobacterium* и *Haliscomenobacter* (филума *Actinobacteriota*) – спорообразующих бактерий, известных своей криоустойчивостью и способностью не только переживать суровые условия полярной зимы, но и активно поддерживать развитие других групп прокариот в условиях короткого биологического сезона.

Качественные и количественные показатели структуры микробных сообществ исследованных водных объектов данной территории свидетельствуют о значительной корреляции между посещаемостью этих объектов и их экологическим состоянием. Поддержание регулярного мониторинга микробиоты различных биотических локусов Антарктического континента позволяет не только пополнять имеющуюся референсную базу данных эндемичного биоразнообразия континента, но и оперативно отслеживать происходящие в нем изменения под влиянием различных условий.

Полевые работы выполнены в рамках 68-й Российской Антарктической Экспедиции (РАЭ ФГБУ «ААНИИ»).

Список литературы:

- Власов Д.Ю., Кирцидели И.Ю., Абакумов Е.В., Новожилов Ю.К.; Зеленская М.С., Баранцевич Е.П. Антропогенная инвазия микромицетов в ненарушенные экосистемы оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) // Российский журнал биологических инвазий. 2020. Т. 13. № 2. С. 23–34. EDN: PKAXWN.
- Шаров А.Н., Толстиков А.В. Гидрологический и биологический режимы озер Восточной Антарктиды // Трансформация экосистем. 2020. Т. 3(3). С. 77–86. DOI: 10.23859/estr-200318
- Callahan B. J., McMurdie P.J., Rosen M. J., Han A. W., Johnson A. J. A., Holmes S. P. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data // Nat. Methods. 2016. Vol. 13. P. 581–583. DOI: 10.1038/nmeth.3869.
- Caruso V., Song X., Asquith M., Karstens L. Performance of microbiome sequence inference methods in environments with varying biomass // mSystems.2019. Vol. 4. Art. e00163-18. DOI: 10.1128/mSystems.00163-18.
- Chen S., Niu L., Dong X. Saccharofermentans acetigenes gen. nov., sp. nov., an anaerobic bacterium isolated from sludge treating brewery wastewater // Int J Syst Evol Microbiol. 2010. Vol. 60. P. 2735–2738.
- Quast C., Pruesse E., Yilmaz P., Gerken J., Schweer T., Yarza P., Glöckner F. O. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools // Nucl. Acids Res. 2012. Vol. 41 (D1). P. 590–596. DOI: 10.1093/nar/gks1219.
- Lovley D.R. [et al.]. Geobacter: The Microbe Electric's Physiology, Ecology, and Practical Applications // Microbial Physiology, Academic Press. 2011. Vol. 59. P. 1–100. DOI:10.1016/B978-0-12-387661-4.00004-5.

УДК 556.535.8

МЕДЬ В СТОЧНЫХ ВОДАХ И В РЕКАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Лукьянов К.В.

Институт географии РАН, Москва, Россия, *kirill.lukyanov.96@mail.ru*

Аннотация. Для ряда крупных речных бассейнов Европейской части России за 2018–2020 гг. рассматривается величина сброса со сточными водами меди – одного из основных элементов загрязнения рек и водоемов. Величина сброса соотносится с фактическим содержанием меди, поступающим к рассматриваемым речным створам. Для большинства этих створов отмечается превышение рыбохозяйственного ПДК по меди, причем вклад сточных вод в это превышение, как и вообще ее содержание за счет сточных вод незначительно. Это свидетельствует о ведущей роли поступлений соединения меди в водные объекты других источников, в основном, по-видимому, диффузного поступления со стоком с водосборов.

Ключевые слова: сточные воды, речные бассейны, содержание меди, рыбохозяйственное ПДК, соотношение сброса и поступления к замыкающим створам.

Введение

Медь, если она содержится в воде в сверхнормативном количестве, один из основных загрязнителей водных объектов. Считается, что значительную роль поступления ее в водные объекты играют сточные воды. У нас в стране ведется мониторинг за сбросом меди со сточными водами и ее содержанием в реках и водоемах, как, впрочем, и другими загрязняющими веществами. Результаты публикуются в соответствующих справочниках, в литературных источниках. Вместе с тем остается недостаточно изученным вопрос о вкладе именно сточных вод в содержание меди в реках и водоемах. Цель данной работы – определить соотношение среднегодовых величин сброса меди со сточными водами и выноса ее с речным стоком на примере ряда крупных речных бассейнов Европейской части России за 2018–2020 гг.

Исходные данные и методы исследования

Сброс меди со сточными водами для рассматриваемых речных бассейнов (Невы, Северной Двины, Волги, Дона, Кубани) за 2018–2020 гг. определен по данным, содержащимся в ежегодных справочниках²⁷ применительно к субъектам, входящим в тот или иной речной бассейн, а содержание (поступление к соответствующим речным створам) – по данным ежегодников ГХИ^{28, 29, 30}, как и величина годового речного стока. Основной метод – сравнительно географический.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты представлены в таблице. Как видно, наибольший объем поступления меди со сточными водами приходится на бассейн Волги. Значительно меньше он у бассейнов Невы и Дона и особенно бассейнов Кубани и Северной Двины. Отметим, что представленные величины значительно меньше того, что было ранее. Так, согласно А. П. Демину (2023), сброс меди со сточными водами в бассейне Волги составил в 1990 г. 373.8 т, в 2000 г. – 57.67 т, в 2009 – 38.3 т. Для 2018 и 2021 гг. соответствующие величины составили 8.61 и 7.38 т. То есть к 2018 г. сброс уменьшился в 43.5 раза, а к 2021 в 51 раз.

²⁷ Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество: Ежегод. Изд. Л., СПб: 2019–2021.

²⁸ Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2018 // ФГБУ «Гидрохимический Институт», 2019. 578 С.

²⁹ Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2019 // ФГБУ «Гидрохимический Институт», 2020. 612 С.

³⁰ Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2020 // ФГБУ «Гидрохимический Институт», 2021. 620 С.

Основная причина – уменьшение общего объема сточных вод после распада СССР и связанное с ним закрытие целого ряда «вредных» производств.

Поступает же меди к рассматриваемым створам с речным стоком во много раз больше, чем сбрасывается со сточными водами, что во всех из них, кроме створа на Северной Двине (Усть-Пенеге), превышает водохозяйственную ПДК, которая равна 0.001 мг/л или 1 т/км³. Наибольшее превышение ПДК отмечается у Невы (более 4 раз), наименьшее у Кубани (в 1.1 раза). Наибольший объем поступления с речным стоком имеет место в бассейне Волги, далее следует бассейн Невы. Значительно уступают им бассейны Северной Двины и особенно Дона и Кубани.

В этих объемах выноса меди с речным стоком доля сточных вод весьма невелика – у Дона – 9.4%, за которым следуют бассейн Кубани (6.4%) и Волги (1.4%). Меньше 1% она у Невы и Северной Двины. Существенно больше доля сброса меди со сточными водами по сравнению со сверхнормативным (выше ПДК) выносом с речными водами, особенно для Кубани (свыше 30%) и Дона (около 27%). Для Волги этот показатель составляет 2.5%, для Невы – менее 1.1%. Для Северной Двины, как уже отмечено выше, концентрация меди в речных водах меньше ПДК.

Небольшая роль сточных вод в выносе меди с речными водами объясняется ведущей ролью других факторов, таких как вторичное загрязнение рек и водоемов и особенно диффузный сток с водосборов. Не исключено, впрочем, что неполон учет сброса меди со сточными водами. Но в любом случае генезис поступления меди, как, наверное, и многих других веществ, в водные объекты, вообще их загрязнения, требует дальнейших исследований.

Заключение

Рассчитан сброс меди со сточными водами в среднем за 2018–2020 гг. в бассейнах Невы, Северной Двины, Волги, Дона и Кубани. Наибольший он у Волги (7.5 т) наименьший у Кубани (0.6 т). Рассчитан также объем притока меди с речным стоком к замыкающим створам рассматриваемых рек, который превысил 540 т у Волги, а наименьшим оказался у Кубани (около 10 т). Выявлено превышение рыбохозяйственной ПДК в воде у всех рек, кроме Северной Двины. Наибольшее оно у Невы (более чем в 4 раза) и Волги (свыше 2 раз). Сопоставление объема сброса меди со сточными водами и приносимого речными водами показало значительное превышение поступления меди с речными водами к рассматриваемым створам по сравнению с содержанием в сбрасываемых сточных водах. Для Волги доля сброса меди со сточными водами немногим превысила 9%, для Кубани 6%, для остальных еще существенно меньше. Значительно больше доля сброса со сточными водами по отношению к сверхнормативному (по рыбохозяйственной ПДК) выносу с речными водами, достигая почти 32% у Кубани и 27% у Дона. Есть все основания предполагать, что основную массу выноса меди с речными водами у рассматриваемых рек составляют другие источники, в первую очередь естественный сток с водосборов, что, впрочем, требует дополнительных исследований.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2026-0003 (1025030300154-4).

Список литературы:

Демин А.П. Водопотребление и водоотведение в бассейне реки Волги // Изв. РАН, Серия географ. 2023. Т. 87. № 6. С. 847–861.

УДК 556.551

**ВНЕШНЯЯ БИОГЕННАЯ НАГРУЗКА НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДЫ
ВОДОХРАНИЛИЩ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ НА ПРИМЕРЕ
КУЙБЫШЕВСКОГО И НИЖНЕКАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ В ГРАНИЦАХ
РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

Минакова Е.А.¹, Шлычков А.П.¹, Кондратьев С.А.², Минакова Д.А.¹

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,
ekologyhel@mail.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и
океанографии, Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. В материалах приводятся результаты количественной оценки внешней биогенной нагрузки на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан (РТ) за период 2001–2019 гг: диффузная биогенная нагрузка (в том числе природная и антропогенная); удержание биогенных элементов на водосборе; организованная антропогенная нагрузка на поверхностные воды; вынос биогенных элементов с водосбора в водные объекты. Установлено, что диффузная нагрузка является основным источником внешней биогенной нагрузки, (величина вклада от диффузных источников составляет 92% *N* и 90% *P*). Впервые для Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ установлено, что основными факторами, определяющими формирование диффузной биогенной нагрузки *N* являются массообмен с атмосферой (45%) и побочные продукты животноводства (30%); факторами, определяющими формирование диффузной биогенной нагрузки *P* являются побочные продукты животноводства (85%) и массообмен с атмосферой (10.2%).

Ключевые слова: водохранилище, внешняя биогенная нагрузка, усовершенствованная модель, организованные и диффузные источники.

В естественных условиях биогенные элементы поступают в водоемы в результате природных процессов, благодаря чему поддерживается равновесие между их поступлением и выведением. В настоящее время на водоемы и водотоки, помимо природных, воздействуют антропогенные факторы, ускоряющие процессы протекания эвтрофирования. Анализ и выбор подходов к количественной оценке основных составляющих внешней биогенной нагрузки на водные объекты представляет собой ключевую задачу, решение которой необходимо для научного обоснования регулирования биогенной нагрузки на водосборах, направленного на снижение антропогенного эвтрофирования водных объектов.

Внешняя биогенная нагрузка формируется за счет выноса химических веществ с водосбора водного объекта в результате воздействия природных и антропогенных факторов (Кондратьев, 2007). Изучение процессов формирования внешней биогенной нагрузки на водные объекты для разработки способов ее снижения – актуальная проблема геоэкологии как с научной, так и практической точек зрения.

Целью настоящего исследования является количественная оценка факторов внешней биогенной нагрузки на поверхностные воды водохранилищ Европейской территории России на примере Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ.

Настоящая работа является продолжением исследований по изучению процессов миграции биогенных элементов в водной геосистеме и разработке методов по оптимизации биогенной нагрузки на водосборе (Минакова и др., 2003, 2012, 2013, 2020, 2022).

Количественная оценка внешней биогенной нагрузки выполнена с использованием усовершенствованной модели *ILLM* – Institute of Limnology Load Model, разработанной в Институте озераведения РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования выноса биогенных веществ с водосборных территорий (Свидетельство о государственной..., 2014).

В общем виде модель представлена следующей формулой (Кондратьев, 2007, 2019; Минакова и др., 2022, Kondratiev et al., 2020):

$$L = (L_{nat\ diff} + L_{antr\ diff}) (1 - k_r) + L_{wl}, \quad (1)$$

где L – внешняя биогенная нагрузка на водный объект, т/год;

$L_{nat\ diff}$ – диффузная природная биогенная нагрузка с подстилающей поверхности различных типов естественных ландшафтов, т/год;

$L_{antr\ diff}$ – диффузная антропогенная биогенная нагрузка, т/год;

k_r – коэффициент удержания вещества водосбором и его гидрографической сетью;

L_{wl} – организованные сбросы биогенных элементов в водный объект, т/год.

Внешняя биогенная нагрузка на водный объект (L) представляет собой результирующую массу выноса биогенных элементов, сформированных на водосборе водного объекта в результате воздействия комплекса диффузных (природных и антропогенных) факторов, определяемых процессами удержания на водосборе, а также массу сбросов от организованных источников биогенной нагрузки, участвующих в формировании антропогенного эвтрофирования.

Для информационного обеспечения исследования созданы базы данных, содержащие информацию о природных и антропогенных факторах, обуславливающих формирование внешней биогенной нагрузки (природно-климатические условия, гидрологический и гидрохимический режим, источники точечной и диффузной биогенной нагрузки), а также материалы проведенной количественной оценки с использованием усовершенствованной модели *ILLM* основных составляющих внешней биогенной нагрузки на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ за период 2001–2019 гг. (Свидетельство о государственной регистрации..., 2024).

Расчеты внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ проводились для соединений азота в пересчете на общий азот (N) и соединений фосфора в пересчете на общий фосфор (P). С использованием усовершенствованной модели *ILLM* за период 2001–2019 гг. выполнена количественная оценка основных составляющих внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ, результаты приведены в табл. 1.

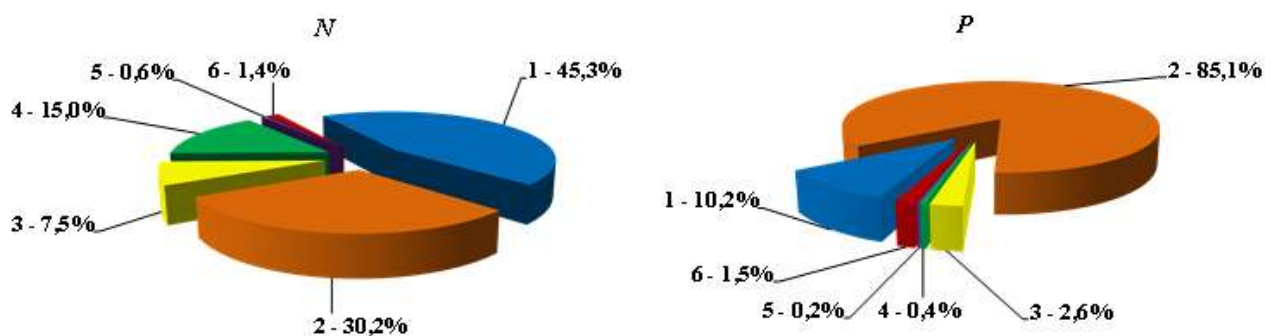
Таблица 1. Результаты количественной оценки основных составляющих внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ

Основные составляющие внешней биогенной нагрузки	тыс. т N /год	тыс. т P /год
Антропогенная нагрузка	92.8	18.7
Природная нагрузка	16.3	0.1
Диффузная биогенная нагрузка на водосбор	109.1	18.8
Удержание биогенной нагрузки на водосборе	65.5	13.5
Вынос биогенных элементов с водосбора	43.6	5.3
Организованная антропогенная нагрузка	3.9	0.6
Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды	47.5	5.9

Выявлено, что на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ удерживается 60% N и 72% P от совокупной массы диффузной биогенной нагрузки. Проведенная количественная оценка показала, что основной вклад в формирование внешней биогенной нагрузки на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ вносит диффузная нагрузка. Доля вклада по N составляет 92%, по P 90%.

Рассчитана доля вклада (в %) в совокупную диффузную биогенную нагрузку (рис.1) на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах РТ от следующих факторов:

- аэротехногенные выпадения;
- побочные продукты животноводства;
- поступление с сельскохозяйственных угодий;
- сток с естественной подстилающей поверхности;
- сток с урбанизированных территорий;
- нагрузка от населения, проживающего в неканализованных районах.



1 – аэротехногенные выпадения; 2 – побочные продукты животноводства; 3 – поступление с сельскохозяйственных угодий; 4 – сток с естественной подстилающей поверхности; 5 – сток с урбанизированных территорий; 6 – нагрузка от населения, проживающего в неканализованных районах

Рис. 1. Доля вклада факторов в совокупную диффузную нагрузку N и P на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ, %

Анализ информации, приведенной на рисунке 2, свидетельствует, что формирование совокупной диффузной биогенной нагрузки N на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ в основном определяется аэротехногенными выпадениями (45%) и влиянием побочных продуктов животноводства (30%). Существенный вклад в поступление N вносит сток с естественной подстилающей поверхности (15%), а также внесение минеральных и органических удобрений (8%). Поступление N со стоком с урбанизированных и неканализованных территориях поселений является незначительным и составляет в совокупности около 2%.

Формирование совокупной диффузной биогенной нагрузки P на Куйбышевское и Нижнекамское водохранилища в границах РТ определяется воздействием побочных продуктов животноводства (85.1%), аэротехногенными выпадениями (10.2%). Вклад от внесения минеральных и органических удобрений составляет 2.6%, – от населения, проживающего на неканализованных территориях поселений 1.5%, – от естественной подстилающей поверхности и стоков с урбанизированных территорий является незначительным (0.4% и 0.2%, соответственно).

Таким образом, установлено, что биогенная нагрузка на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ определяется диффузными источниками. Основной вклад в диффузную биогенную нагрузку N вносит массообмен с атмосферой (45%) и побочные продукты животноводства (30%), – P побочные продукты животноводства 85.1% и массообмен с атмосферой 10.2%.

Список литературы:

Данилов-Данильян, В. И. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохраных программ / В. И. Данилов-Данильян, В. О. Полянин, Т. Б. Фащевская [и др.] // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 503–514.

- Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.
- Кондратьев, С. А. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоток-водоем / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова. – СПб: Нестор-История, 2019. 248 с.
- Минакова Е.А. Подходы к региональному нормированию нагрузки фосфор- и азотсодержащих минеральных удобрений на водосборную площадь реки / Е. А. Минакова, В. З. Латыпова, Ю. П. Переведенцев // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 12. С. 36–41.
- Минакова Е.А. Поверхностный сток биогенных элементов с аграрно освоенных водосборов: роль метеорологических факторов / А. П. Шлычков, В. З. Латыпова, Е. А. Минакова, А. Р. Ильясова // Проблемы региональной экологии. 2012. № 4. С. 55–61.
- Минакова Е.А. Оценка антропогенной нагрузки предприятий на водные объекты Республики Татарстан / Е. А. Минакова, А. Ю. Мелквист, Е. Г. Мухаметшина, А. П. Шлычков, А. В. Сушкова Экология и промышленность России. 2013. № 6. С. 39–41.
- Минакова Е.А. Внешняя биогенная нагрузка организованных источников на водотоки в пределах Республики Татарстан в современный период / Е. А. Минакова, А. П. Шлычков, Э. И. Биктемирова, С. А. Кондратьев // Проблемы региональной экологии. 2020. № 1. С. 74–78.
- Минакова Е.А. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме «водосбор – водный объект» в современных условиях / Е. А. Минакова, А. П. Шлычков, С. А. Кондратьев // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 2. С. 13–21.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612519 Российская Федерация. Расчет формирования биогенной нагрузки на водные объекты северо-запада России на основе модели ILLM: № 2013661852 : заявл. 19.12.2013 опубл. 27.02.2014 / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова; заявитель и правообладатель ФГБУН Институт озераведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН).
- Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623845 Российская Федерация. «Внешняя биогенная нагрузка на поверхностные воды Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан» : № 2024623515 : заявл. 13.08.2024 : опубл. 30.08.2024 / Е. А. Минакова; правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (RU).
- Kondratyev S.A. Model-Based Assessment of Nutrient Load into Water Bodies from Different Landscape Types / S.A. Kondratyev, N.V. Ignatyeva, M.V Shmakova., A.A. Ershova, E.A. Minakova, A.V. Terekhov // Landscape Modelling and Decision Support "Innovations in Landscape Research" Cham, Switzerland: Springer Int. Publ. AG, 2020. Pp. 299–310.

УДК 556.555.4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА: СОВРЕМЕННЫЙ АНАЛИЗ

Науменко М.А., Гузиватый В.В.

Санкт-Петербургский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ГОСНИОРХ» им. Л.С. БЕРГА»)

Санкт-Петербург, Россия

m.a.naumenko@mail.ru

Аннотация. В докладе представлены среднеклиматические (фоновые) параметры термического состояния крупнейшего европейского димиктического озера – Ладожского, сравнение с которыми позволяет оценивать степень внешнего воздействия как климатического, так и сезонного характера. Обсуждаются изменения ледовых условий, периодов полного весеннего и осеннего перемешивания, продолжительности устойчивой вертикальной стратификации, дат наступления годовых максимумов температуры на различных горизонтах от поверхности до дна в различных лимнических районах Ладожского озера.

Ключевые слова: годовой ход температуры, весенняя и осенняя изотермия, лимнические районы, димиктическое Ладожское озеро

Крупные озера Мира подвержены декларируемым климатическим изменениям и являются индикаторами этих изменений (Kraemer et al., 2015; Livingstone, 1993). Для количественной оценки климатических вариаций в димиктическом Ладожском озере необходимо знание фоновых средних климатических параметров термического состояния, сравнение с которыми позволит оценить степень внешнего воздействия (Филатов и др., 2013; Науменко, 2021a). Целью настоящей работы является краткий обзор современных авторских публикаций, в которых представлены новые разработки и результаты изучения различных климатических проявлений в термике Ладожского озера.

Димиктизм озерной толщи проявляется в том, что озеро дважды в год перемешивается от поверхности до дна за счет аномалии плотности пресной воды при температуре 3.98°C на поверхности. Следствием аномалии плотности воды является ежегодное возникновение весенней (осенней) термических фронтальных зон (термобара) в Ладожском озере. Проанализировано среднеклиматическое распределение температуры поверхности воды, особенности распределения ее в весенний (со второй половины апреля до начала июля) период существования термического фронта и его продвижения от мелководных районов озера в глубоководную часть (Науменко, Каретников, 2002; Науменко, 2021b). В этот период горизонтальные градиенты температуры поверхности воды могут превышать градиенты температуры воздуха в два раза (Науменко и др., 2012). Показано более раннее исчезновение фронтальной зоны по сравнению со средними многолетними датами в Ладожском озере.

Для периода весенней-летней стратификации оценены аномалии и экстремальные отклонения реальных пространственных распределений от типичных(фоновых) для масштабов синоптической изменчивости. Степень аномальности изменяется от месяца к месяцу. Наиболее аномальным распределением температуры поверхности характеризуется прибрежный мелководный район. Самый аномальный месяц периода открытой воды – июль (Науменко, Тимофеева, 2009).

Климатические соотношения температуры воздуха и поверхности воды для различных лимнических районов в период открытой воды, в том числе гистерезис между температурами воздуха и температурой водной массы озера, а также отличия изменений температуры воды при изменении температуры воздуха на 1°C в период нагревания и охлаждения, обсуждались в статье (Науменко, Гузиватый, 2022).

Статистический анализ вертикальных профилей температуры, измеренной за длительный период времени с 1897 по 2017 гг. в центральной части Ладожского озера, позволил впервые разработать эмпирические количественные соотношения между параметрами стратификации с высокими коэффициентами детерминации. Исходя из различия физических особенностей процессов нагревания и охлаждения поверхности озера, для каждого из периодов найдены регрессионные зависимости, которые описывают сезонный ход термических параметров Ладожского озера на различных глубинах. Оценены скорости изменения температуры воды и изменения параметров слоя скачка (Науменко, Гузиватый, 2022а, 2022б). Впервые выявлен гистерезис параметров слоя скачка. На основе полученных соотношений были установлены зависимости между температурой поверхности озера и параметрами слоя скачка, что имеет важное значение для определения характеристик вертикальной стратификации в период открытой воды в Ладожском озере дистанционными методами (Науменко, Гузиватый, 2024; Naumenko et al., 2024).

Для периода открытой воды с мая по ноябрь на основе совместного анализа климатического сезонного хода температуры поверхности воды и температуры придонного горизонта с декадным осреднением были определены характерные даты возникновения и диссипации вертикальной стратификации в Ладожском озере, которые могут служить реперами (нормами) для обнаружения отклонений от среднеклиматического хода.

Ледовые процессы в Ладожском озере играют значительную роль не только в термогидродинамической картине озера, но и в его экологическом состоянии. На основе авиационных и космических съемок ледовой ситуации озера с 1943 года по настоящее время обнаружено, что средняя общая продолжительность ледовых явлений составляет 171 ± 3 суток со второй половины ноября по первую декаду мая. Период, когда озеро полностью покрыто льдом (если он наступает), составляет около двух месяцев, хотя его продолжительность может варьировать от нескольких дней до 120 суток. Начиная с зимы 2013–14 гг. полный ледостав на всей акватории Ладожского озера наблюдался только зимой 2017–2018 гг. Таким образом, за последние десять лет каждую зиму были открытые участки воды в глубоководной части озера. Зимний подледный режим придонных температур требует особого рассмотрения.

Определены термические показатели, которые могут служить базовыми для оценки отклика реально измеренных или смоделированных термических параметров Ладожского озера на вариации климата, а также для сравнения с другими димиктическими озерами мира.

На основе анализа большого массива измерений температуры за столетний период определены характерные температуры и даты сезонного возникновения и диссипации вертикальной стратификации в течение года в связи с вариациями придонной температуры. Проведена оценка дисперсии и скорости изменения придонных температур в различные сезоны. Начиная с глубины 100 м, в течение летнего периода существуют очень малые колебания придонной температуры в Ладожском озере. В зимний сезон эти колебания составляют примерно 1.5°C и во многом зависят от даты возникновения и продолжительности периода открытой воды акватории и интенсивности вертикальной и горизонтальной конвекции.

Рассмотренные термические показатели могут служить базовыми для оценки отклика реально измеренных или смоделированных термических параметров Ладожского озера на вариации климата, а также для сравнения с другими димиктическими озерами мира.

Список литературы:

Науменко М.А., Гузиватый В.В. Связаны ли параметры устойчивой плотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера? // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 328–344. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344.

Науменко М.А. и др. Вертикальное распределение годовых максимумов температуры воды в южной прибрежной зоне озера Байкал // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. № 3. С. 157–170.

Науменко М.А. Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021а. Т. 14. № 2. С. 78–88. DOI: 10.7868/S2073667321020076.

Науменко М.А. Реакция димиктических озер на климатические изменения // *Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата*. Москва. Российская академия наук. 2021б. С. 194–198. EDN HFQEYM.

Науменко М.А., Гузиватый В.В. Климатические соотношения между температурой воздуха и температурами воды различных лимнических районов Ладожского озера // *География и природные ресурсы*. 2022. Т. 43. № 1. С. 83–92. DOI 10.15372/GIPR20220109.

Науменко М.А., Гузиватый В.В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58. № 1. С. 52–62. DOI 10.31857/S0002351522010102.

Науменко М.А., Каретников С.Г. Сезонная эволюция пространственного распределения температуры поверхности воды Ладожского озера в связи с его морфометрией // *Доклады Академии Наук*. 2002. Т. 386. № 2. С. 250–253.

Науменко, М. А., Гузиватый, С. Г. Каретников. Изменчивость горизонтальных градиентов температуры поверхности воды и воздуха в весенней фронтальной зоне Ладожского озера // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 6. С. 798. EDN PNPNCU.

Науменко, М. А., Тимофеева Л. А. Аномалии полей температуры поверхности воды Ладожского озера синоптических масштабов // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 12. С. 77–85. EDN KZBCMT.

Филатов Н.Н., Руховец Л.А., Назарова Л.Е., Баклагин В.Н., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Толстиков А.В., Шаров А.Н. Влияние изменений климата на экосистемы озер. *Вестник РФФИ*. 2. № 78. 2013. С. 43–50.

Kraemer B.M., Anneville O., Chandra S., Dix M., Kuusisto E., Livingstone D. M., Rimme A., Schladow S. G., Silow E., Sitoki L., Tamatamah R., Vadeboncoeur Y., McIntyre P. B. Morphometry and Average Temperature Affect Lake Stratification Responses to Climate Change // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. № 12. P. 4981–4988. DOI: 10.1002/2015GL064097.

Livingstone D.M. Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: A short-term climatic change indicator? // *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1993. № 25. P. 75–81.

Naumenko M.A., Guzivaty V.V., Lovtsov S.V., Troitskaya E.S., Budnev N.M. Vertical distribution of annual water temperature maxima in the southern coastal zone of Lake Baikal. // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. Vol. 3. Pp. 157–170. DOI:10.31951/2658-3518-2024-A-3-157.

УДК 504.054; 574.583; 582.26

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Разумовский В.Л., Анисимова А.В.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, *nethaon@mail.ru*

Аннотация. Проанализированы данные по содержанию тяжелых металлов из проб донных отложений Иваньковского, Рыбинского и Клязьминского водохранилищ. Выявлена корреляция между концентрациями металлов в донных осадках рядом характеристик водохранилищ. Установлен общий тренд к снижению концентраций большинства тяжелых металлов в осадках. Применен метод графического анализа таксономических пропорций диатомовых комплексов для подтверждения отсутствия переотложений в исследуемых колонках.

Ключевые слова: тяжелые металлы, водохранилища, донные отложения, палеореконструкции

Содержание тяжелых металлов в источниках питьевой воды является одним из основополагающих критериев их качества. В связи с этим, выявление закономерностей накопления тяжелых металлов в донных осадках водохранилищ является важным направлением оценки состояния и прогнозирования перспектив изменения качества питьевой воды на прилегающих территориях.

Иваньковское, Рыбинское и Клязьминское водохранилища являются крайне перспективными объектами для данного исследования, т. к. в силу своего возраста (свыше 75 лет) их донные осадки успели накопить значительный массив данных по изменению концентраций тяжелых металлов в водоеме (Волков, 2011). Помимо своего возраста, исследуемые водохранилища представляют большую ценность для выявления закономерностей накопления тяжелых металлов, в силу различной степени проточности, размера и удаленности от источников диффузного загрязнения.

Материалом для исследований послужили колонки донных отложений, отобранные с 2017 по 2019 г. Колонка из Иваньковского водохранилища была отобрана в районе группы островов (56.791, 36.933) в июле 2017 г. Длина колонки 19 см. Колонка из Рыбинского водохранилища была отобрана в районе Коприно (58.089, 38.294) в июле 2018 г. Длина колонки составила 51 см. Колонка из Клязьминского водохранилища была отобрана в заливе, в августе 2019 г., в непосредственной близости от пос. Красная Горка и пос. Птицефабрики (55.988, 37.548). Длина колонки составила 24 см (рис. 1).

Помимо химического анализа, была проведена идентификация панцирей диатомовых водорослей (Renberg, 1990; Генкал, 2015) из колонок ДО. Полученные данные были проанализированы методом графического анализа таксономических пропорций (Разумовский, 2009). Это позволило с высокой степенью достоверности установить отсутствие существенных нарушений, переносов и переотложений в исследуемых колонках ДО.

Химический анализ ДО проводился по 53 элементам. Наиболее показательные закономерности изменения концентраций были получены для следующих металлов: Li, Co, Ni, Cu, As, Sc и Ga. Степень сопряженности источников поступления данных элементов была верифицирована методом парной корреляции.

В первую очередь стоит отметить крайне высокую степень сопряженности содержания Li, Ni и Cu для Клязьминского водохранилища, чьи коэффициенты корреляции находятся в интервале: 0.87–0.96, аналогичные тенденции были установлены для Co и Ga (коэффициент корреляции 0.87), а также для As и Sc (коэффициент корреляции 0.69). Помимо этого, для всех этих упомянутых выше элементов наблюдается заметное увеличение концентрации в нижней части колонки ДО.

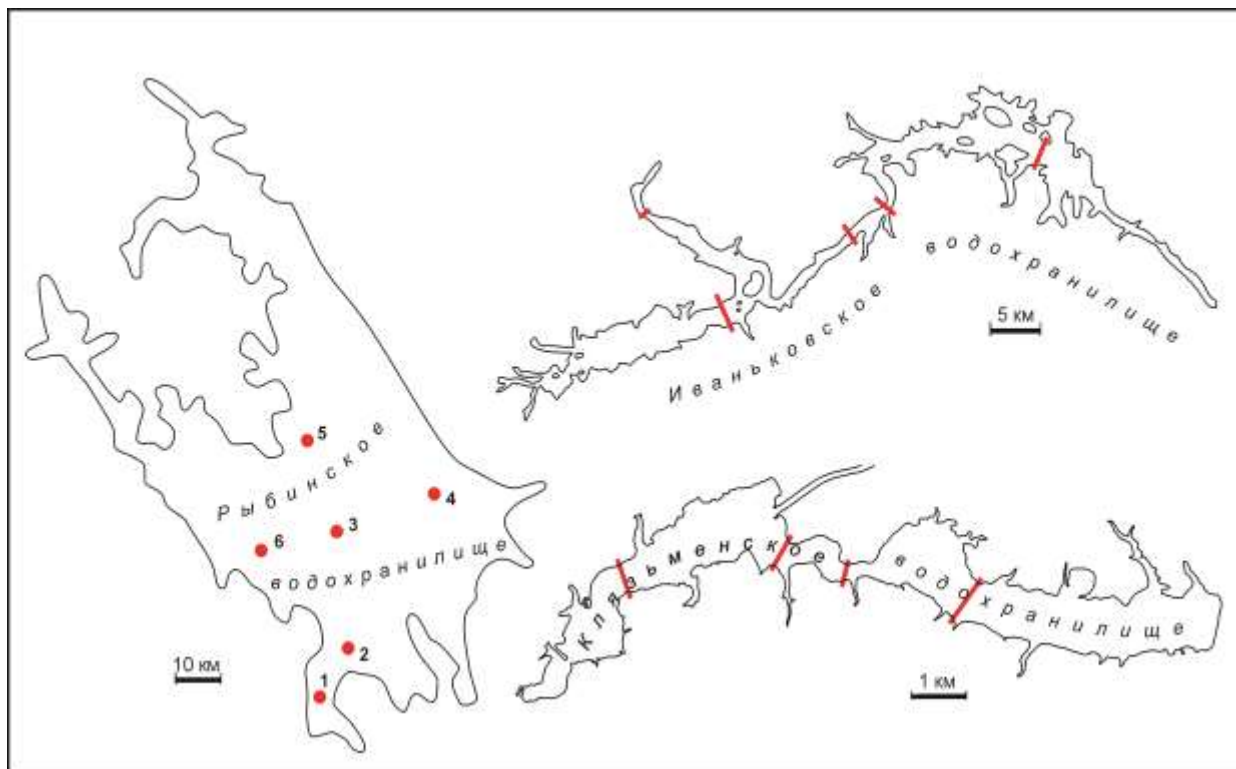


Рис. 1. Карта-схема Иваньковского, Рыбинского и Клязьминского водохранилища. Цилиндрической фигурой выделены точки отбора колонок донных отложений

Для Иваньковского водохранилища наблюдается снижение концентраций Cu и Zn в верхней части колонки ДО, с коэффициентом корреляции равен 0.93. Помимо этого, наблюдается выраженная корреляция между концентрациями Ni, Li, Rb и Cr с коэффициентом корреляции 0.7 до 0.93. Это является косвенным свидетельством единого источника поступления данных элементов в водную среду.

К отличительным особенностям накопления тяжелых металлов в осадках Рыбинского водохранилища относятся высокая степень корреляции по всему спектру исследуемых элементов. Показатель парной корреляции ни в одном случае не падает ниже 0.5 (Zn и Ni), а максимальный коэффициент корреляции 0.98 наблюдается для Ni и Co. Подавляющая часть исследуемых элементов имеет коэффициент парной корреляции в интервале 0.8-0.9.

Приведенные выше данные позволяют сделать предположение, что основными факторами, влияющим корреляцию содержания металлов в донных отложениях, является площадь водного зеркала и объем водохранилищ, а также источники их поступления. В частности, наличие наибольшего числа источников диффузного загрязнения, в сочетании с его относительно небольшим объемом, приводит к относительно низкой корреляции между различными исследуемыми элементами для Клязьминского водохранилища. В то время, как для наиболее крупного и удаленного от источников диффузного загрязнения, Рыбинского водохранилища, степень корреляции крайне высока.

Выводы

1. С помощью метода графического анализа таксономических пропорций диатомовых комплексов было установлено отсутствие переотложений в исследуемых образцах, что значительно повышает достоверность проведенных исследований.

2. Выявлена зависимость между площадью водного зеркала водохранилищ и их удаленностью от источников диффузного загрязнения с корреляцией различных представителей группы тяжелых металлов по разрезу донных отложений.

3. Во всех исследуемых водохранилищах наблюдается высокая степень корреляции между концентрациями различных тяжелых металлов, что позволяет предположить наличие одного или нескольких общих источников их поступления.

Работа выполнена в рамках госзадания ИВП РАН № FMWZ-2025-0002.

Список литературы:

- Волков Д.А. Качество вод Клязьминского водохранилища // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2011. № 4. С. 48–52.
- Генкал С.И., Охапкин А.Г. Центрические диатомовые водоросли (Centrophyceae, Bacillariophyta) планктона р. Клязьмы (РФ) // Гидробиол. журнал. 2015. № 6. Т. 51. С. 41–55.
- Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И. Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // Доклады академии наук. Общая биология. 2009. Т. 429. № 3. С. 274–277.
- Renberg I. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores // Journal of Paleolimnology. 1990. Vol. 4. Pp. 87–90.

УДК 504.4.054

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД В
БАССЕЙНЕ АНГРАПЫ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА ТРЕХЛЕТНИЙ
ПЕРИОД**

Спирин Ю.А.¹, Зотов С.И.², Таран В.С.²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия, *spirin.yuriy@rambler.ru*

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,
zotov.prof@gmail.com, ronya.volkova@yandex.ru

Аннотация. В рамках исследования проведен пространственно-временной анализ состояния водных ресурсов бассейна трансграничной реки Анграпы (Калининградская область) за период с 2022 по 2025 гг. Ключевой задачей работы являлось выявление закономерностей загрязнения и определение основных факторов, влияющих на качество воды.

Ключевые слова: динамика загрязнения водотоков, бассейн р. Анграпы, гидрохимический анализ, качество вод, картографирование загрязнения рек, природно-хозяйственные факторы

Снижение качества пресных вод – ключевая экологическая проблема, вызванная сельским хозяйством, промышленностью и коммунальными стоками. Это ведет к эвтрофикации, накоплению загрязнителей и снижению биоразнообразия. Бассейн р. Анграпы, расположенный в юго-восточной части Калининградской области разнообразен по своим природно-хозяйственным характеристикам, что делает его перспективным полигоном для исследования этих вопросов. Ее водосбор, частично расположенный в Польше и Литве, что создает потенциальный трансграничный характер загрязнения. Несмотря на высокую экологическую ценность территории (включая Национальный парк «Виштынецкий»), ее мониторинг ограничен всего двумя пунктами контроля, что недостаточно для оценки. Большинство исследований носят гидрологический характер (Шамонина и Нелюбина, 2017; Берникова и др., 2019; Тылик, 2021; Ахмедова и Наумов, 2022; Ахмедова и др., 2024), а современных данных о химическом составе вод с учетом пространственной неоднородности не хватает.

Проанализируем пространственное распределение загрязнения по годам на основе удельно комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ) с учетом критических показателей загрязнения (КПЗ) (рис. 1).

Как показано на рис. 1, данные демонстрируют следующую пространственную логику: качество воды последовательно снижается от истоков, берущих начало в лесных массивах, к низовьям, подверженным интенсивному сельскохозяйственному и городскому воздействию. Исключением из этого тренда является зона слияния рек Писсы и Анграпы, где гидрохимические показатели улучшаются относительно вышерасположенных створов наблюдения.

Данный процесс можно связать с несколькими факторами. Во-первых, между пунктами мониторинга А3 и А4 существует значительный пространственный разрыв, обусловленный неравномерным распределением ключевых зон землепользования в бассейне. На этом протяженном участке часть загрязняющих веществ могла быть вовлечена в процессы естественной седиментации. Во-вторых, существенную роль, вероятно, сыграло разбавляющее влияние притоков Анграпы – рек Тихая, Селецкая и Разливная, водосборы которых приурочены к территории Национального парка «Виштынецкий». Их более благоприятный фоновый химический состав мог способствовать улучшению качества воды в основном русле перед впадением в р. Писсу.

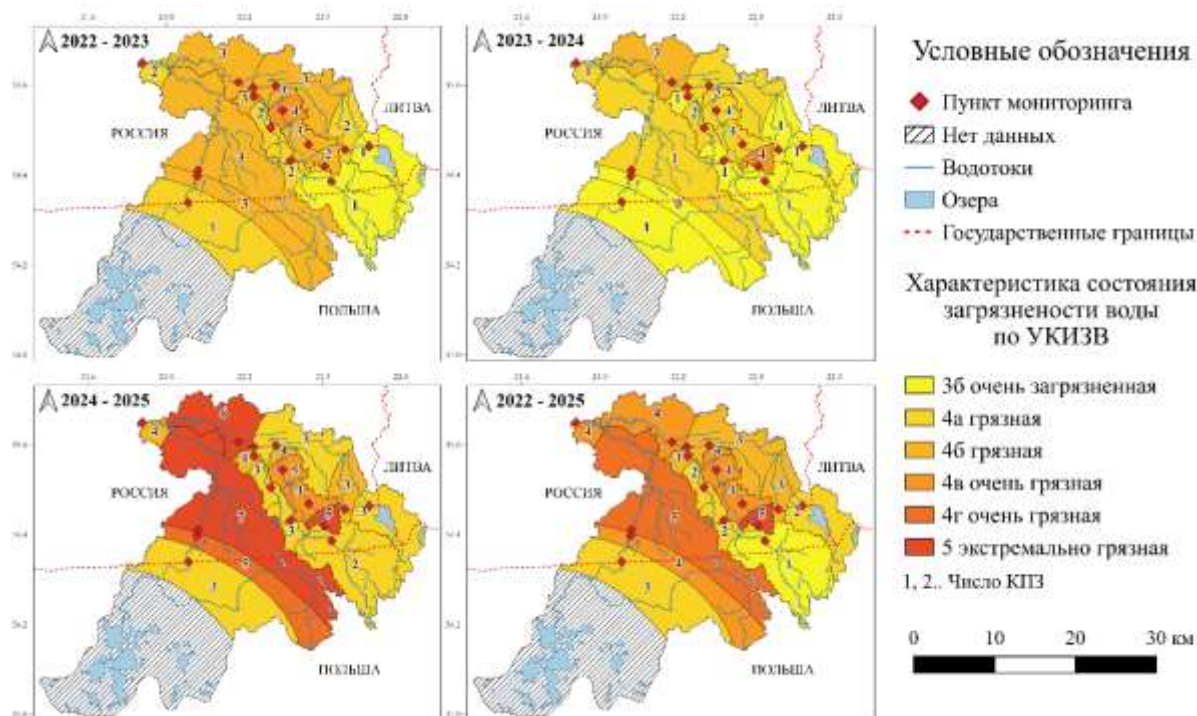


Рис. 1. Пространственно-временная дифференциация качества воды на основе УКИЗВ в бассейне р. Анграпы за различные периоды с 2022 по 2025 гг.

Следовательно, на данном участке произошло компенсирующее смешение вод: относительно менее загрязненная р. Анграпа, разбавив более загрязненные воды р. Писсы, привела к общему снижению концентраций загрязнителей. Этот случай наглядно иллюстрирует, что локальные участки с пониженной нагрузкой и естественные процессы самоочищения в среднем течении способны нивелировать эффект кумулятивного переноса загрязнений от верховьев речной системы.

Чтобы количественно оценить изменения во времени, был рассчитан обобщающий показатель – среднее арифметическое значений УКИЗВ и КПЗ по всем четырем пунктам наблюдений (рис. 2).

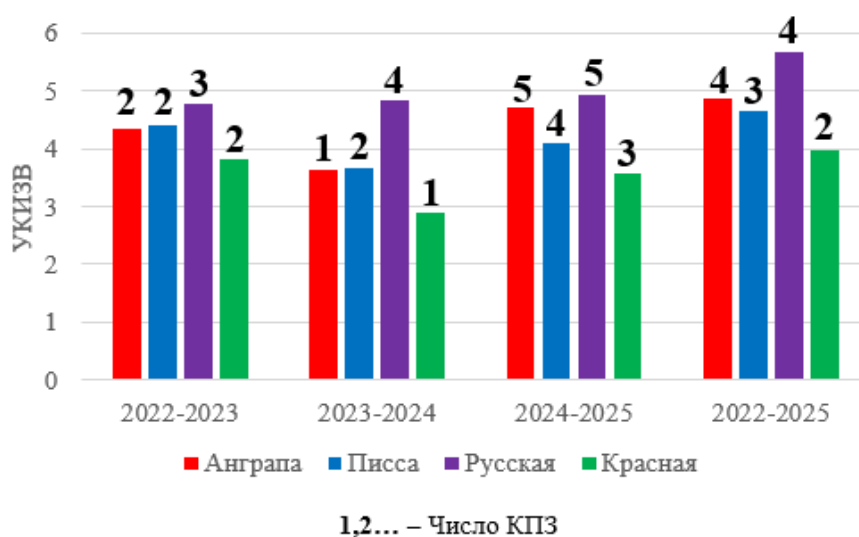


Рис. 2. Динамика среднегодового по четырем пунктам мониторинга УКИЗВ и КПЗ в реках бассейна Анграпы

Анализ данных (рис. 2) позволяет провести градацию качества воды по бассейнам на основе УКИЗВ для различных периодов наблюдений. **2022–2023 гг.:** реки Анграпа, Писса и Красная характеризовались как 4а грязные, тогда как вода в р. Русской соответствовала более низкой категории 4б грязная. **2023–2024 гг.:** в р. Русской отмечено дальнейшее ухудшение состояния до класса 4в очень грязная. Качество воды в р. Красной, напротив, улучшилось до 3б очень загрязненной. Реки Анграпа и Писса сохранили статус 4а грязные. **2024–2025 гг.:** в р. Анграпе зафиксировано снижение качества до 4а очень грязная, а в р. Писсе – до 4б грязная. Р. Русская осталась классом 4в очень грязная, а р. Красная в свою очередь вновь приобрела состояние 4а грязная.

В целом для всего бассейна обобщенный класс качества в 2022–2023 и 2023–2024 гг. определялся как 4а грязная, а к 2024–2025 гг. ухудшился до 4б грязная. При этом в каждом отдельном периоде сохранялась стабильная иерархия загрязненности между водотоками.

За весь трехлетний цикл наблюдений (2022–2025) наиболее неблагоприятное состояние устойчиво демонстрировала р. Русская. Следующие позиции в рейтинге загрязнения занимают р. Анграпа и р. Писса. Наилучшие показатели, соответствующие статусу регионального гидрологического памятника природы, отмечены у р. Красной. Класс качества воды в среднем по бассейну за весь период составил 4б грязная. Сезонная динамика показывает, что осенью состояние вод бассейна ухудшается до класса 4в очень грязная, тогда как зимой, весной и летом оно соответствует категории 4а грязная.

На основе анализа приоритетных загрязняющих веществ, регулярно превышающих ПДК, можно выделить следующие систематические загрязнители: нефтепродукты, соединения железа, биогенные элементы. Большой вклад в индекс загрязнения вносят показатели кислородного режима, превышающие нормативы. В структуре всех зафиксированных превышений ПДК на долю нефтепродуктов приходится 26.36%, а железа – 20.04%, что в совокупности составляет более трети загрязнений. Группа кислородных показателей, включающая растворенный кислород (25.85%), ХПК (6.69%) и БПК₅ (4.65%), ответственна за 37% нарушений. На биогенные соединения (фосфаты – 9.96%, аммоний – 2.38%, нитриты – 1.33%) суммарно приходится около 14%.

Сопоставление пространственно-временной динамики интегральных индексов с данными по конкретным веществам-загрязнителям в контексте природных и антропогенных особенностей бассейна позволяет определить ведущие факторы, формирующие качество воды. Основным каналом поступления нефтепродуктов являются промышленные и коммунальные сточные воды, содержащие поверхностно-активные вещества с углеводородными компонентами. Повышенные концентрации общего железа носят в значительной степени природный характер и обусловлены региональными гидрогеологическими условиями, способствующими обогащению им подземных вод (Государственный доклад..., 2025). Превышения по биогенным элементам и кислородным показателям в верховьях рек, вероятно, связаны с естественной деструкцией водной растительности, тогда как в низовьях решающий вклад вносит диффузный сток с сельскохозяйственных территорий (Зотов и др., 2024; Спирин и др., 2025).

Список литературы:

Ахмедова Н.Р., Валл Е.В., Наумов В.А. Сравнение уровней воды реки Анграпы середины XX и начала XXI века // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32, № 1. С. 7–15. DOI 10.22363/2313-2310-2024-32-1-7-15.

Ахмедова Н.Р., Наумов В.А. Динамика модуля годового стока в бассейне реки Писса // Вестник ИШ ДВФУ. 2022. № 2 (51). С. 105–111. DOI 10.24866/2227-6858/2022-2/105-111.

Берникова Т.А., Тылик К.В., Цветкова Н.Н. Физико-географическая характеристика реки Красной – памятника природы гидрологического профиля Калининградской области // Известия КГТУ. 2019. № 52. С. 11–23.

Государственный доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2024 году». Калининград: ООО «ВИА Калининград», 2025. С. 45–46.

Зотов С.И., Спирин Ю.А., Таран В.С. Оценка химического загрязнения и качества вод рек юго-восточной части Калининградской области // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2024. Т. 88. № 4. С. 554–567. DOI: 10.31857/S2587556624040086.

Спирин Ю.А., Зотов С.И., Таран В.С., Платоненко Г.О. Оценка влияния природных условий и хозяйственной деятельности на качество воды в реках // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2025. № 6. С. 40–41.

Тылик К.В. Гидроэкологические особенности реки Красной – памятника природы гидрологического профиля Калининградской области // Известия КГТУ. 2021. № 61. С. 39–50. DOI 10.46845/1997-3071-2021-61-39-50.

Шамонина Т.В., Нелюбина Е.А. Анализ водного использования бассейна реки Писсы // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. № 2. С. 1–8.

УДК 551.464.649(262.5)"2025"

**КОНЦЕНТРАЦИЯ РТУТИ В ВОДЕ И ВЗВЕСИ ЧЕРНОГО МОРЯ В 2025 Г.
(ПО МАТЕРИАЛАМ РЕЙСОВ НИС «ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ»)**

Стецюк А.П.

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия,
stetsiuk_a.p@ibss-ras.ru

Аннотация. Выполнено исследование по распределению концентраций ртути в акватории Черного моря в 2025 г. по материалам экспедиционных рейсов 134, 135 и 137 НИС «Профессор Водяницкий». Показаны диапазоны содержания ртути, удельной массы взвеси и коэффициента накопления ртути взвешенным веществом в морской воде. Наиболее высокое содержание растворенной формы ртути за весь период исследования (100.5 и 102.5 нг/л), было выявлено на станциях, расположенных в предпроливе Керченского канала (март 2025 г.).

Ключевые слова: ртуть, взвесь, коэффициент накопления, Черное море

Изучение распределения концентрации ртути в морских экосистемах является актуальной задачей в связи с ее сильной токсичностью. Ртуть не только опасный загрязнитель окружающей среды, но и имеет большое значение как поисковый критерий на сульфидные руды и углеводородные залежи. Основными источниками поступления ртути в Черное море являются речные, промышленные и коммунальные стоки, а также судоремонтные и нефтеперерабатывающие предприятия, сельское хозяйство, дампинги коммунально-бытовых и промышленных отходов (Егоров и др., 1992). По расчетам, в Черном море содержится около 14 тыс. тонн ртути, в том числе около 840 т находится в наиболее продуктивном 0–50 м слое водной толщи (Костова и др., 2001). В шельфовых районах, подверженных большому антропогенному влиянию, значительная роль в формировании полей ртутного загрязнения принадлежит взвешенному веществу (Костова и др., 2006). Содержание металлов в различных гранулометрических фракциях взвешенного вещества увеличивается с уменьшением размера фракций за счет роста удельной поверхности частиц, что способствует выведению тяжелых металлов из водного раствора и увеличению их сорбции на поверхности материала взвеси (Папина, 2001). Взвешенное вещество может накапливать ртуть до высоких уровней, далее в результате седиментации аккумулироваться в донных осадках, способствуя, таким образом, самоочищению морской акватории.

Целью данной работы было определение концентрации ртути в морской воде и оценка ее накопления во взвеси Черного моря.

Пробы воды были отобраны с помощью батометров гидрологического комплекса. Все пробы воды были профильтрованы через нуклеопоровые фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Взвешенное вещество анализировали на приборе РА-915Лаб, а профильтрованную воду на РА-915М. Химический анализ проб воды и взвеси производился в соответствии с методиками ПНД Ф 14.1:2.4.271-2012, М 01-55-2016, М 03-10-2022.

Коэффициенты накопления ртути взвешенным веществом рассчитывали по формуле:

$$K_{\text{взв}} = C_{\text{взв}} / C_{\text{w}},$$

где $C_{\text{взв}}$ – концентрация Hg во взвешенном веществе (нг/г сухой массы); C_{w} – концентрация растворенной формы Hg в воде (нг/л). Формула расчета коэффициента накопления ртути во взвеси аналогична формуле, приведенной для расчета коэффициента накопления гидробионтами (Поликарпов, 1964).

В табл. 1 представлены диапазоны таких параметров, как концентрация растворенной и взвешенной формы ртути, удельная масса взвеси и коэффициенты накопления ртути взвешенным веществом.

Таблица 1. Диапазоны параметров: удельная масса взвеси в воде, концентрация растворённой формы ртути, концентрация ртути в сухой массе взвешенного вещества, коэффициент накопления ртути во взвеси.

№ рейса НИС «Профессор Водяницкий»	Дата рейса	Удельная масса взвеси в воде ($m_{уд}$), г/м ³ на сухой вес	C_w (нг/л) растворенная	$C_{взв}$ (нг/г сухой массы)	Коэффициент накопления ртути взвесью ($K_{взв} \times 10^4$)
134	14.03.– 08.04.2025	0.08–6.69	49.4–102.5	297.4– 38740.0	0.34–60.25
135	22.05.– 16.06.2025	0.36–1.41	4.9–13.0	430.0–5505.0	8.78–80.96
137	11.09.– 06.10.2025	0.37–8.7	22.6–94.6	1.3–4356.7	0.01–8.39

Результаты исследования показали варьирование удельной массы взвешенного вещества в пределах 0.08–8.7 г/м³ на сухой вес. При этом максимальная масса взвешенного вещества соответствовала достаточно низкой концентрации растворенной формы ртути. Наиболее высокая концентрация растворенной формы ртути за весь период исследования (100.5 нг/л и 102.5 нг/л), была выявлена на станциях, расположенных в предпроливе Керченского канала. Концентрации ртути в пробах морской воды, отобранной в марте-апреле 2025 г., были выше, чем в последующих пробах, отобранных в 135-м и 137-м рейсах. Следует отметить, что 134-й рейс был посвящен изучению последствий загрязнения мазутом вследствие аварии двух танкеров «Волгонефть», перевозивших мазут в Керченском проливе, произошедшей в декабре 2024 г. Анализ состояния воды показал существенное превышение ПДК значений углеводородов на 2 станциях на предпроливном участке Черного моря, находящихся южнее места крушения танкеров (Соловьева и др., 2025). Возможно, что более высокие концентрации ртути в марте 2025 г. также связаны с последствиями произошедшей ранее аварии. Как известно, в нефтях различных месторождений обнаружено более 30 элементов металлов, а содержание Hg при этом составило $0.02\text{--}30.0 \times 10^6$ г/г (Путанова, 1974, Поконова и др., 1984). Принято считать, что элементы, содержащиеся в микроколичествах в нефти, могут находиться в ней в виде мелкодисперсных водных растворов солей, тонкодисперсных взвесей минеральных пород, а также в виде химически связанных с органическими веществами комплексных или молекулярных соединений (Богомолов и др., 1995). Предполагаемое происхождение Hg в нефтях – из организмов-нефтеобразователей и в результате адсорбции микроэлементов (Путанова, 1974). В конце мая и начале июня (135-й рейс), концентрация растворенной формы ртути в морской воде значительно снизилась до 4.9–13.0 нг/л (табл. 1). Концентрация ртути в морской взвеси варьировала в более широком диапазоне в марте-апреле 2025 г. Более высокие значения коэффициента накопления обнаружены в мае-июне 2025 г., что может свидетельствовать о переходе к этому периоду растворенной формы ртути во взвешенное вещество и запуске механизмов самоочищения морской акватории. В сентябре 2025 г., концентрация растворенной формы ртути в Черном море варьировала от 22.6 до 94.4 нг/л. При этом, концентрация ртути находилась больше в растворенном виде, чем накопилась во взвешенном веществе (табл. 1).

В результате исследования было установлено, что концентрация ртути в пробах, отобранных в 134, 135 и 137 рейсах, незначительно превысила ПДК (100 нг/л) лишь на двух станциях, расположенных в предпроливе Керченского канала со значениями 100.5 и 102.5 нг/л.

Работа выполнена по теме гос. задания № 124030100127-7, а также благодаря центру коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» (рейсы 134, 135, 137) ФГБУН

ФИЦ ИнБЮМ. Благодарю Т.В. Помогаеву, И.Г. Сидорова и М.О. Вахрушева за отбор проб воды в 134-м и 135-м рейсах. Пробы в 137-м рейсе были отобраны автором лично.

Список литературы:

Богомолов А.И., Гайле А.А., Громова В.В. и др. Химия нефти и газа / Под ред. В.А. Проскурякова, А.Е. Драбкина. СПб: Химия, 1995. 448 с.

Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Светашева С.К. Загрязнение Черного моря ртутью с речным стоком и способность его вод к самоочищению в результате протекания биохимических циклов // Оценка расположенных на суше источников загрязнения морей, омывающих государства СНГ. Материалы Международной конференции, Севастополь, 6–10 апреля 1992 г. Севастополь, 1992. Т. 1. С. 61–62.

Костова С.К., Егоров В.Н., Поповичев В.Н. Многолетние исследования загрязнения ртутью Севастопольских бухт (Черное море) // Экология моря. 2001. Вып. 56. С. 99–104.

Костова С.К., Поповичев В.Н., Егоров В.Н., Плотицына О.В., Артемов Ю.Г. Распределение ртути в воде и донных отложениях в местах локализации струйных метановых газовыделений со дна Черного моря // Морской экологический журнал. 2006. Т. 5. № 2. С. 47–56.

Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взвешенное вещество – донные отложения речных экосистем. Аналитический обзор. Новосибирск. Сер. Экология. 2001. Вып. 62. 58 с.

Поконова Ю.В., Гайле А.А., Спиркин В. Г., Чертков Я. Б., Фахрутдинов Р. З., Сафиева Р.З., Тахистов В.В., Батуева И. Ю. Химия нефти. Л.: Химия, 1984. 360 с.

Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов. М.: Атомиздат, 1964. 296 с.

Путанова С.А. Микроэлементы нефтей, их использование при геохимических исследованиях и изучении процессов миграции. М.: Недра, 1974.

Соловьева О.В., Тихонова Е.А., Зарипова К.М. Нефтяное загрязнение Керченского пролива после аварии танкеров «Волгонефть» в декабре 2024 г. // Морской биологический журнал. 2025. Т. 10. № 3. С. 96–104. DOI: 10.21072/mbj.2025.10.3.08

УДК 556.51.028

ФАКТОРЫ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕТНЕГО МЕЖЕННОГО СТОКА (НА ПРИМЕРЕ ОДНОГО ИЗ РЕГИОНОВ ЦЕНТРА РУССКОЙ РАВНИНЫ)

Тобратов С.А., Железнова О.С.

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, Рязань, Россия,
tobratovsa@mail.ru

Аннотация. Несмотря на снижающийся вклад летней межени в суммарные годовые расходы воды, летний сток и связанная с ним миграция элементов весьма важны, поскольку соответствуют периоду максимальной интенсивности функционирования ландшафтов. В работе обобщается опыт индикации пирогенной опасности по модулю летнего меженного стока и использования данного модуля в эколого-геохимических расчетах, обосновывается возможность экстраполяции летних концентраций элементов на среднегодовые.

Ключевые слова: модуль летнего меженного стока, критические нагрузки эвтрофирующего азота, пожары 2010 года, фазы водного режима, тяжелые металлы, радионуклиды, среднегодовые концентрации элементов

Текущие климатические изменения инспирируют трансформацию структуры водного баланса, что, в частности, привело к значительному уменьшению вклада летней межени в годовой сток (с конца XX в. летняя межень в Центре России стала глубже зимней). Параллельно происходят геохимические изменения твердого и ионного стока, а также меняются параметры эколого-геохимической устойчивости ландшафтов, связанные с водной миграцией вещества. Особый интерес представляют засушливые летние сезоны, позволяющие дать летним ландшафтно-гидрологическим процессам минимальную оценку.

В данном сообщении обсуждаются некоторые результаты исследований, выполненных нами в 2010-2011 гг. в ландшафтах Рязанской области. Исследования охватывали экстремальные по аридности летние месяцы 2010 г. и проводились на двух уровнях – региональном и местном (ландшафтном). Региональная гидрологическая съемка включала геохимическое опробование и гидродинамические измерения на 137 малых водотоках (с площадью бассейнов порядка десятков-сотен км²). Расходы воды измерялись при помощи гидрометрической вертушки ГР-21, химический состав, содержание частиц твердого стока и удельная активность радионуклидов определялись в НИЛ геохимии ландшафтов РГУ имени С. А. Есенина; полевые и лабораторные исследования полностью выполнены авторами. Ландшафтный уровень исследований предполагал аналогичный комплекс измерений в рамках 2 модельных бассейнов малых рек, удаленных от источников техногенного загрязнения и представляющих фоновые ландшафтные условия природных зон смешанных лесов (Мещерская низменность) и лесостепи (Среднерусская возвышенность). Измерения и опробования в модельных бассейнах проводились в течение годового цикла каждые 1.5–2 месяца, в период половодья 2011 г. – каждые 3–6 дней, что позволило оценить вклад каждой фазы водного режима в миграцию вещества и выявить специфику летнего меженного стока (Кривцов и др., 2011).

На региональном этапе исследований установлено, что местный меженный сток под влиянием ландшафтных факторов существенно меняется от места к месту (рис. 1): различия между экстремальными значениями превышают 500 раз (без учета водотоков, где в условиях засухи поверхностный сток прекратился – на рис. 1 их бассейны показаны белой заливкой). Установлена оптимальная норма летнего меженного стока для Мещерской природной провинции, не вызывающая переосушение в условиях засухи и исключая пожары – 0.05 л/с×км². Данная величина зафиксирована в бассейнах малых рек Совка (достигнута за счет противопожарного шлюзования в замыкающем створе) и Ураж (причина природная – бобровые плотины). В то же время в бассейнах Кельцы, Кади и Белой по причине нерационально организованного дренажа меженный сток почти на порядок превысил

безопасную величину и достиг $0.40-0.50 \text{ л/с} \times \text{км}^2$ (рис. 1). Именно данные бассейны отличались максимальными масштабами пирогенного поражения и стали основными источниками задымления атмосферы в Центре России, вследствие чего, например, в Москве в августе 2010 г. наблюдался двукратный рост смертности.

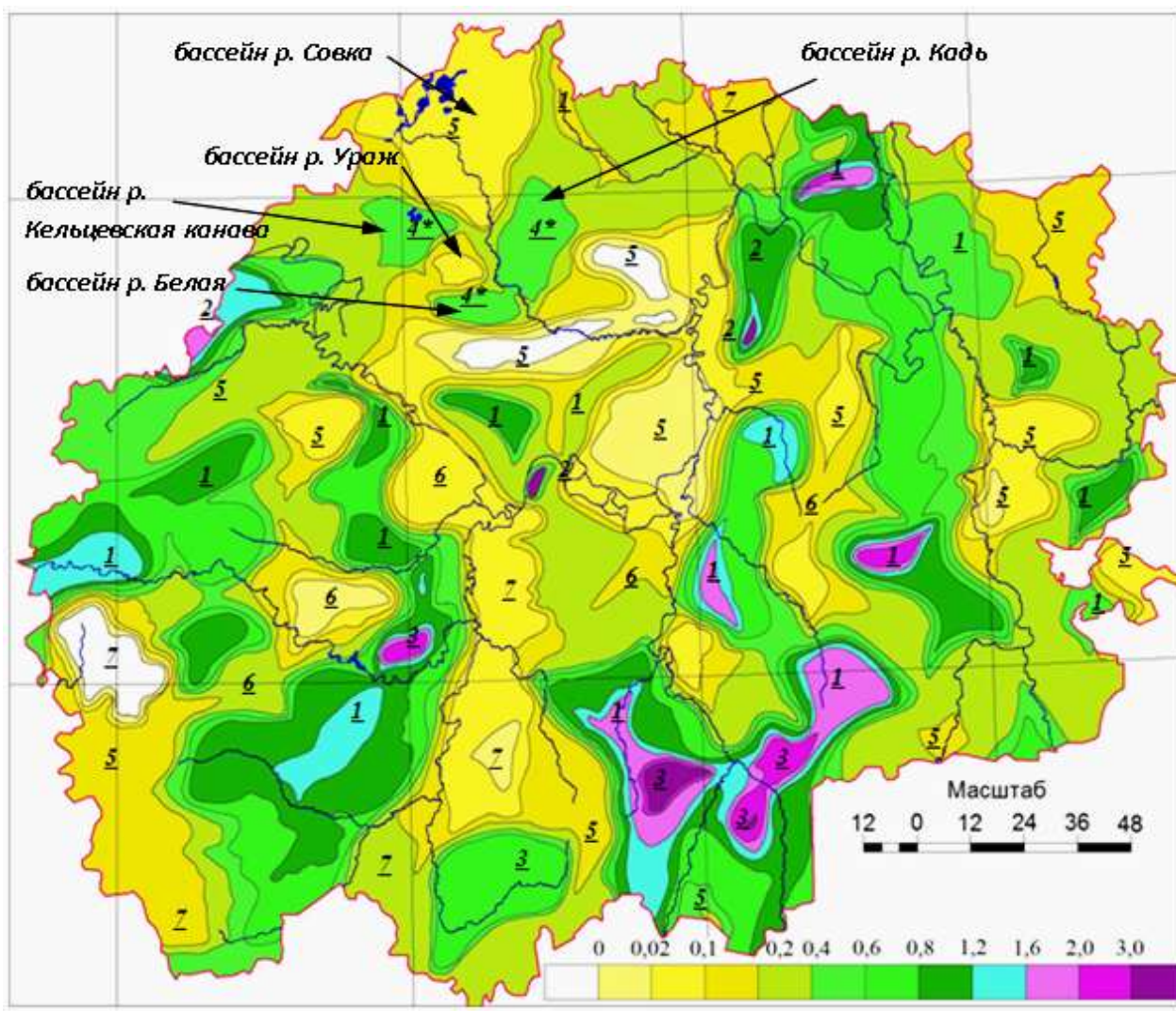


Рис. 1. Модуль летнего меженистого стока ($\text{л/с} \times \text{км}^2$) в различных ландшафтных условиях, данные получены в июле-августе 2010 г. Цифрами показаны наиболее характерные ландшафтные условия, определяющие неоднородность меженистого стока: **способствуют росту стока:** 1 – границы тектонических структур; 2 – то же, в условиях выраженных разнонаправленных вертикальных движений соседних структур; 3 – районы широкого распространения западин на водоразделах и надпойменных трассах; 4 – широкая сеть мелиоративных каналов на торфяниках Мещерской низменности; **способствуют снижению стока:** 5 – отрицательные тектонические структуры, пологие крылья складок; 6 – инверсионные структуры рельефа (в т.ч. каменные поля); 7 – водопроницаемые породы (известняки). *основные очаги верховых и низовых пожаров в Мещере летом 2010 г. (в т.ч. в районах, практически не посещаемых туристами).

Модули летнего меженистого стока были использованы при расчете региональных величин критических нагрузок элементов (экологически безопасного для природных экосистем уровня химического загрязнения через атмосферу) по известным моделям (Spranger et al., 2004), в первую очередь при расчете допустимого привноса эвтрофирующего азота. При

оценке уровня выщелачивания соединений азота $N_{le(acc)}$ используется величина местного стока:

$$N_{le(acc)} = Q \times [N]_{acc}$$

где $[N]_{acc}$ – допустимая концентрация азота в почвенных и грунтовых водах, не вызывающая питательных дисбалансов: константа, зависящая от зонального типа экосистем (г-экв/м³), Q – поверхностный сток («excess precipitation») (м³/га/год).

По нашему мнению, следует использовать в качестве Q при расчете $N_{le(acc)}$ не годовой, а летний меженный сток, т.к. свыше 90% годового стока не связано с периодом активной вегетации, а биологическое потребление азота происходит в основном в летний сезон. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

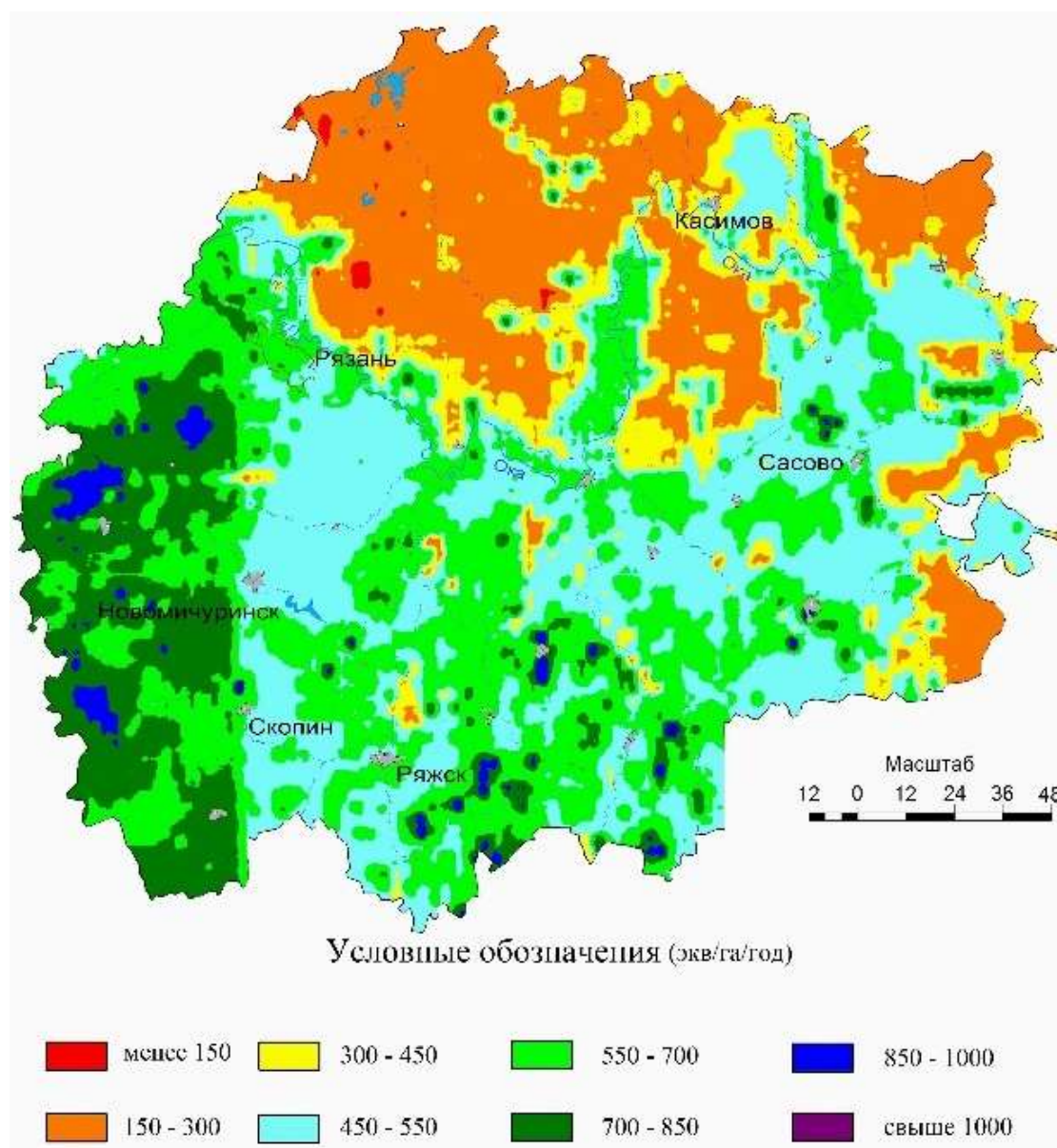


Рис. 2. Критические нагрузки эвтрофирующего азота на экосистемы Рязанской области

На «ландшафтном» этапе исследований, в частности, определено долевое участие фаз водного режима в годовом стоке и его зональные особенности (табл. 1). Контрастный рельеф вполне ожидаемо увеличивает внутригодовую неоднородность стока: возрастает вклад

Таблица 1. Водный режим модельных зональных водотоков ландшафтного уровня (в % от годового стока).

Фазы водного режима	Среднерусская возв., лесостепь	Мещера, подтайга
Летняя межень: с 1 июня по 31 августа	1.9	2.8
Осень (начало паводка): с 1 сентября по 31 октября	2.8	5.3
Предзимье (пик и спад паводка): с 1 ноября по 31 декабря	9.4	13.5
Зимняя межень: с 1 января по 14 марта	9.5	8.6
Половодье: с 15 марта по 30 апреля	62.9	50.5
Поздняя весна (спад уровня до минимума): с 1 по 31 мая	13.4	19.3

весеннего половодья, а различия летней и зимней межени увеличиваются с 3 до 5 раз. В любых ландшафтных условиях сток в летний сезон минимален; данный эффект был дополнительно усугублен засухой.

В то же время вынос многих элементов был в 2-3 раза и даже в 8 раз выше доли водообмена, характерной для летней межени. Сформировался летний максимум водного выноса, который имел выраженный полигенетический характер и был связан с влиянием отдаленных последствий предшествующего половодья, сезонным ростом скорости химических реакций (в т.ч. выветривания), происходившим в июне – до начала засухи – просачиванием почвенных вод после выпадения осадков, испарительным концентрированием, микробиологической трансформацией торфяных аккумуляций (в условиях Мещерской низменности) и т.д. Наиболее значительная летняя «аномалия» водного выноса – 23% против 2.8%, обеспеченных влиянием фактора водообмена – зафиксирована для коллоидного кальция (проявилось влияние большинства указанных выше причин), менее существенные максимумы отмечены для твердого стока, взвешенных форм всех ТМ и радиоцезия (почвенный источник), а также хлора (выветривание хлорапатитов меловых отложений в условиях питания рек наиболее глубокими горизонтами грунтовых вод) и некоторых других элементов. В модельной лесостепной геосистеме летний максимум выноса наблюдался для почти того же набора элементов, что и в Мещере, но был выражен несколько хуже в связи с экстремально низким водообменом. Преобладал литогенный вклад, а роль почвенного источника была обусловлена в основном «запоздавшим» последствием весеннего половодья, что индицирует динамика миграции ^{137}Cs . Как и в Мещере, в лесостепи наблюдалась летняя активизация образования коллоидов и взвешенных частиц, и наибольшая интенсивность перехода во взвесь была характерна для меди.

Летний сезон удобен для эколого-гидрохимического опробования, но экстраполяция полученных летом данных на весь годовой цикл проблематична. Избежать субъективности в подобных экстраполяциях возможно, используя понятие среднегодовых «эффективных» концентраций. Данные концентрации рассчитываются на основе весовых коэффициентов, характеризующих продолжительность каждой фазы водного режима и внутригодовую изменчивость химического состава поверхностных вод. Опуская промежуточные расчеты, представим итоговую таблицу (табл. 2), где приведены переходные коэффициенты от летних к среднегодовым «эффективным» концентрациям элементов и частиц твердого стока, удельным активностям радионуклидов и величинам pH. Коэффициенты, меньшие единицы, свидетельствуют о снижении концентраций данного элемента в иные фазы водного режима (в основном за счет разбавления снеговыми водами в период половодья); если коэффициенты больше единицы, то это указывает на пассивность водной миграции элемента и ее усилении под влиянием роста водообмена).

Таблица 2. Множители для перехода от концентраций элементов в поверхностных водах в период летней межени (июль) к среднегодовым «эффективным» гидрохимическим и радиологическим параметрам.

Ландшафтный регион	pH	Макроэлементы										Твердая фаза
		$N-NO_3$	$N-NH_4$	N_Σ	Ca_Σ	Ca^{2+}	Na^+	Mg_Σ	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	
Мещера, подтайга	0.79	2.14	1.65	2.04	0.12	0.49	0.95	0.40	0.46	0.44	2.27	0.651
Среднерусская возв., лесостепь	0.93	6.90	0.87	4.54	0.97	1.63	1.14	0.90	3.89	5.56	2.73	0.825
Ландшафтный регион	Тяжелые металлы								Радионуклиды			
	$\frac{Cu_p}{Cu_n}$	$\frac{Zn_p}{Zn_n}$	$\frac{Pb_p}{Pb_n}$	$\frac{Cd_p}{Cd_n}$	Cu_Σ	Zn_Σ	Pb_Σ	Cd_Σ	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Мещера, подтайга	$\frac{2.75}{0.44}$	$\frac{7.29}{1.50}$	$\frac{0.85}{4.35}$	$\frac{0.96}{0.79}$	0.98	2.23	1.15	0.93	12.1	3.04	-	-
Среднерусская возв., лесостепь	$\frac{1.70}{0.54}$	$\frac{2.85}{1.55}$	$\frac{2.60}{2.26}$	$\frac{0.85}{1.08}$	0.73	1.75	2.44	0.88	0.70	0.74	0.013	0.028

Примечание: $Cu_p...Cd_p$ – растворимые формы ТМ; $Cu_n...Cd_n$ – нерастворимые (твердофазные) формы ТМ; $Cu_\Sigma...Cd_\Sigma$ – валовые геохимические потоки ТМ.

Методы определения: pH и макроэлементов (кроме Ca_Σ и Mg_Σ) – потенциометрический, тяжелых металлов и Ca_Σ и Mg_Σ – атомно-абсорбционный, радионуклидов – гамма-спектрометрический, твердой фазы – гравиметрический.

Данные, полученные нами в репрезентативных бассейнах, могут быть полезны для иных исследователей при проведении эколого-геохимических изысканий и оценке пожароопасности в мелиоративных системах смежных регионов центра Русской равнины, сходных по природным условиям (в том числе в Московской области).

Список литературы:

Кривцов В.А., Тобратов С.А., Водорезов А.В. Комаров М.М., Железнова О.С. Соловьева Е.А. Природный потенциал ландшафтов Рязанской области / под ред. В.А. Кривцова, С.А. Тобратова. Рязань: Ряз. гос. ун-т имени С. А. Есенина, 2011. 768 с.

Spranger, T., Lorenz, U., Gregor, H. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends. Berlin: Federal Environment Agency, 2004. 266 p.

УДК 504.064.36

К ВОПРОСУ ОБ ИСТОЧНИКАХ ПОВЫШЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВАНАДИЯ И МОЛИБДЕНА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА

Хорошевская В.О., Голубкина М.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт»,
Ростов-на-Дону, Россия, vv.z2@yandex.ru

Аннотация: в статье обобщены данные по источникам поступления биометаллов (ванадия и молибдена) в воды акватории восточной и центральной части Таганрогского залива. Приведены содержания растворенных форм соединений этих металлов превышающие ПДК в воде залива. Установлено, что донные отложения Таганрогского залива являются источником вторичного загрязнения этими металлами.

Ключевые слова: Таганрогский залив, ванадий, молибден, фитопланктон, взвешенные вещества

Ванадий – один из самых распространенных рассеянных элементов: по содержанию в земной коре он занимает 22-е место среди всех элементов. В свободном виде в природе этот металл не встречается и не образует собственных минералов. В природных водах ванадий образует устойчивые анионные комплексы $(V_4O_{12})^{4-}$ и $(V_{10}O_{26})^{6-}$. В миграции ванадия существенную роль играют растворенные комплексные соединения его с органическим веществом, особенно с гумусовыми кислотами (Никаноров, Иваник, 2014).

Молибден в свободном виде не встречается, в земной коре молибден распространен относительно равномерно. В поверхностных водах молибден находится в основном в форме MoO_4^{2-} (Никаноров, Иваник, 2014). Речной сток содержит 58% молибдена во взвеси, остальное количество приходится на растворенные формы (Гордеев, 1983). Речная взвесь обогащена молибденом в значительной мере вследствие его участия в биологических процессах.

Соединения ванадия и молибдена являются ядами с самым разнообразным и часто весьма сильным действием на организм. Ванадий токсичен, как в виде катионов, так и в виде анионов. Степень токсичности зависит от валентности ванадия, и растворимости различных его соединений. Соединения четырех- и пентавалентного ванадия относятся к 3 классу опасности. Молибден токсичен, его класс опасности 2-ой (высоко опасный). ПДК ванадия и молибдена для пресноводных объектов рыбохозяйственного значения составляет 1.0 мкг/л (Иванов, 1996). В связи с высокой токсичностью ванадия и молибдена необходим надежный контроль за содержанием их соединений в окружающей среде.

В лабораторных экспериментах на природной воде р. Дон по изучению влияния добавок анионных форм ванадия и молибдена в широком диапазоне концентраций от 0.5 до 100 мкг/л было установлено, что в мезотрофных условиях пресноводных объектов анионные формы этих металлов при превышении ПДК в 5–25 раз могут оказывать существенное влияние на показатели развития фитопланктона: повышать его численность или биомассу, изменять структуру фитопланктона, а также соотношение численности и биомассы отдельных таксонов и сообщества в целом (Предеина и др., 2018; Хорошевская и др., 2016; Antipov, 2013; Leimkühler, 2013).

Основным источником поступления ванадия и молибдена в Таганрогский залив является речной сток. По нашим данным было установлено, что в устье рек Дон и Миус в 2012–2014 гг. в различные гидрологические фазы отмечались в воде концентрации соединений ванадия и молибдена, превышающие нормативы, установленные для водотоков рыбохозяйственного значения. В воде устья р. Дон концентрации соединений ванадия варьировали от 8 до 10 мкг/л, соединений молибдена – от 2 до 4 мкг/л, в воде устья р. Миус концентрации соединений ванадия – от 3 до 22 мкг/л, соединений молибдена 3 до 12 мкг/л (табл. 1) (Хорошевская и др., 2016).

Таблица 1. Содержание ванадия и молибдена в поверхностных водах Таганрогского залива и рек в него впадающих, мкг/л.

Таганрогский залив	Место выпуска очищенных вод городских сооружений г. Таганрог	В морских водах ³¹	Устье р. Дон (данные авторов)	Устье р. Миус (данные авторов)	Малые реки г. Таганрога	В речных водах ³²
ванадий						
$\frac{8.0-24.0}{16.0}$	3.5	2.0	$\frac{7.5-9.7}{8.6}$	$\frac{2.5-21.5}{12.0}$	18.9	$\frac{0.2-4.5}{2.35}$
молибден						
$\frac{4.0-11.0}{7.5}$	1.7	10.0	$\frac{2.2-4.2}{3.4}$	$\frac{2.5-12.1}{7.1}$	8.0	$\frac{2.1-10.6}{6.35}$

Примечание: в числителе приводится диапазон изменений содержания металлов, в знаменателе – среднее значение

Среднегодовой сток р. Дон в нижнем течении по отношению к среднемуголетнему, последние пятнадцать лет планомерно снижается и изменяется не только количественно, но и меняется соотношение вод, его формирующих, в нем снижается доля атмосферных осадков и повышается доля подземного стока (Косенко и др., 2018), содержащего большое количество различных микроэлементов, включая ванадий и молибден. По расчетам авторов в среднем со стоком р. Дон в Таганрогский залив в 2013 г. выносилось 28.6 тонн ванадия и 22.1 тонны молибдена. Помимо стока р. Дон, свой вклад в поставку ванадия и молибдена в Таганрогский залив вносят р. Миус и малые реки Приазовья. Со стоком р. Миус в 2013 г. выносилось в среднем 2.5 тонны ванадия и 3.1 тонны молибдена.

Другим важным источником поступления ванадия и молибдена в прибрежные воды Таганрогского залива являются сточные воды г. Таганрог. В 2006 г. среднегодовые концентрации ванадия и молибдена достигали 2 мкг/л в прибрежных водах в районе выпуска очистных сооружений г. Таганрог и рядом с санкционированной свалкой морского грунта порта (Вишневецкий, Ледяева, 2012). Проблема несанкционированных сбросов неочищенных стоков через ливневый коллектор г. Таганрог в воды Таганрогского залива в районе села Петрушино долгое время не решалась. Здесь фиксировалось превышавшие ПДК соединения ванадия – в 4 раза, молибдена – в 2 раза. В работе (Вишневецкий, Ледяева, 2012) приводятся данные мониторинга, из которого видно, что в 2005 г. воды малых рек г. Таганрога (Валовая балка, Малая и Большая Черепаша) характеризовались высоким содержанием соединений ванадия и молибдена, концентрации которых значительно превышали ПДК и достигали соответственно 19 мкг/л и 8 мкг/л (табл. 2).

Для Таганрогского залива характерен интенсивный водообмен и перемешивание водных масс. Шееобразные течения с суточным периодом, направленные днем к устью впадающей в залив реки Дон, а ночью – от устья реки в сторону моря, вызывают суточные колебания уровня воды, достигающие у побережья г. Таганрога амплитуды от 50 до 80 см. Основной причиной возникновения течений в Таганрогском заливе является ветер, вызывающий, в основном, течения смешанного типа. Непосредственно от воздействия ветрового поля на воду образуются сгонно-нагонные перемещения водных масс. Вследствие этих процессов речные и прибрежные воды, содержащие повышенные концентрации ванадия

31База знаний | Гидрохимия http://cawater-info.net/water_quality_in_ca/hydrochem3.htm(дата обращения 12.01.2026)

32Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.

Таблица 2. Содержание ванадия и молибдена в донных отложениях Таганрогского залива, мкг/г.

Ванадий, мкг/г			Молибден, мкг/г			Кларки для сланцев и глин, мкг/г		ДК (допустимый уровень концентраций загрязняющими веществами), мкг/г	
октябрь 2012 г.	апрель 2014 г.	июль 2014 г.	октябрь 2012 г.	апрель 2014 г.	июль 2014 г.	ванадий	молибден	ванадий	молибден
$\frac{13-36}{25}$	$\frac{8.4-30}{17}$	$\frac{13-52}{30}$	$\frac{0.88-4.0}{1.32}$	$\frac{0.4-0.94}{0.93}$	$\frac{0.44-2.0}{0.74}$	130.0	2.0	-	10.0

Примечание: в числителе приводится диапазон изменений содержания металлов, в знаменателе – среднее значение

и молибдена, разносятся по всей акватории Таганрогского залива и накапливаются в донных отложениях, откуда они вторично поступают в воду.

В 2012 и 2014 гг. авторами были проведены работы по определению содержания ванадия и молибдена в донных отложениях в 12 точках, расположенных на акватории Таганрогского залива. По полученным данным содержание в донных отложениях в октябре 2012 г. ванадия изменялось в диапазоне от 13.0 до 36.0 мкг/г сухого веса, в апреле 2014 г. от 8.4 до 30.0 мкг/г, в июле 2014 г. увеличивалось – от 13.0 до 52.0 мкг/г, молибдена – от 0.88 до 4.00 мкг/г в октябре 2012 г., в апреле 2014 г. снижалось от 0.40 до 0.94 мкг/г, в июле от 2014 г., от 0.44 до 2.00 мкг/г (табл. 2). В октябре 2014 г. в районе возле порта г. Мариуполя содержание молибдена в донных отложениях достигало значений, превышающих его кларк для осадочных пород в два раза (кларк – 2 мкг/г). В то же время эти значения не превышали 10 мкг/г – допустимый уровень концентрации (ДК) загрязняющих веществ в донных отложениях водоемов в соответствии с зарубежными нормами (Warner, 2002).

Донные отложения могут быть вторичным источником металлов, при изменении физико-химических условий из них происходит поступление растворенных соединений ванадия и молибдена в придонные слои воды (Хорошевская, 2015). Этот процесс отмечался для соединений ванадия в 2014 г. (рис. 1). В апреле 2014 г. содержание соединений этого металла в донных отложениях Таганрогского залива в среднем составило 17.0 мкг/г, что на 43% меньше, чем в июле того же года, в сезон интенсивного развития фитопланктона, который его аккумулирует и переносит в донные отложения. Для молибдена такой закономерности не отмечалось (рис. 2).

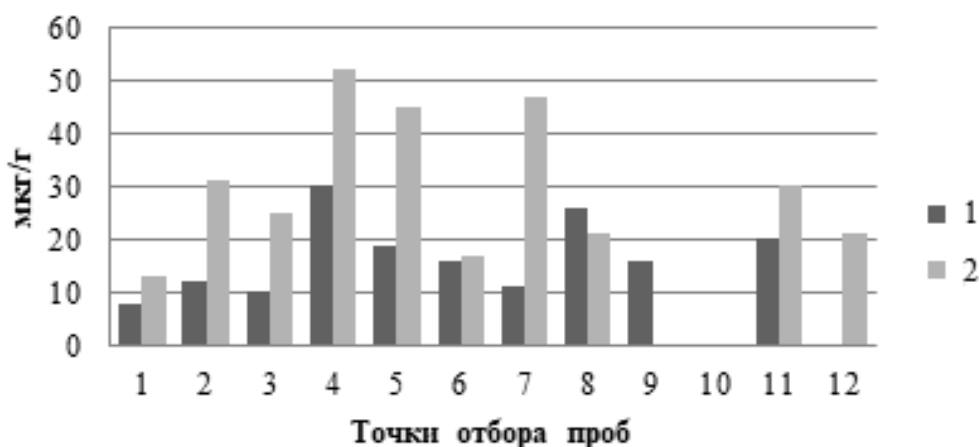


Рис. 1. Гистограмма распределения содержания ванадия в донных отложениях Таганрогского залива (1 – апрель 2014 г., 2 – июль 2014 г.)

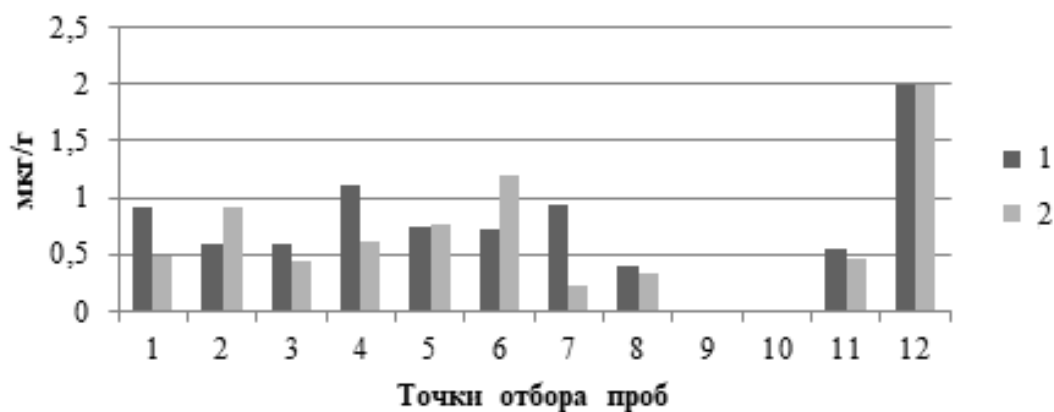


Рис. 2. Гистограмма распределения содержания молибдена в донных отложениях Таганрогского залива (1 – апрель 2014 г.; 2 – июль 2014 г.)

Учитывая тот факт, что растворенные соединения ванадия и молибдена поступают в воду, в основном, в анионной форме (Никаноров, Иваник, 2014), можно предположить, что поступление этих биометаллов в Таганрогский залив и их рециклинг из донных отложений является одним из важных факторов, стимулирующих развитие фитопланктона и усиливающих цветение воды цианобактериями.

Список литературы:

- Вишневецкий В.Ю., Ледяева В.С. Экспериментальные исследования динамики концентрации тяжелых металлов в поверхностном слое воды в Таганрогском заливе // Инженерный вестник Дона. Сетевое издание. № 4 (часть 1), 2012 г.
- Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. М.: Экология, 1996. 190 с.
- Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Картамышева Т.Б. Роль стока реки Дон в формировании продуктивности Таганрогского залива // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Т. 1. № 3-4. С. 32–39.
- Никаноров А.М., Иваник В.М. Словарь-справочник по гидрохимии и качеству вод суши (понятия и определения). Ростов-на-Дону: Из-во ООО «Центр Печатных Технологий Артартель», 2014. 548 с.
- Предеина Л.М., Хорошевская В. О., Андреев Ю. А., Котова В. Е. Влияние молибдена на фитопланктон, БПК₅ и активность щелочной фосфатазы в лабораторном эксперименте // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 4 (76). С. 82–91.
- Хорошевская В.О. Распределение ванадия, никеля и молибдена в донных отложениях Таганрогского залива // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2015. № 3. С. 113–118.
- Хорошевская В.О., Предеина Л.М., Кожевников А.В., Коренева К.О. Эксперимент по установлению влияния ванадия на жизнедеятельность фитопланктона // Вода: химия и экология. 2016. № 4. 2016. С.79–86.
- Antipov A.N. Vanadium in Live Organisms // Encyclopedia of Metalloproteins / Kretsinger, R.H., Uversky, V.N., Permyakov, E.A. (eds). Springer, New York, NY, 2013. DOI:10.1007/978-1-4614-1533-6_135

Leimkühler S. Molybdenum and Ions in Living Systems // Encyclopedia of Metalloproteins / Kretsinger, R.H., Uversky, V.N., Permyakov, E.A. (eds). Springer, New York, NY, 2013. DOI: 10.1007/978-1-4614-1533-6_132

Warmer H., van Dokkum R. Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95, 2002.

УДК 504.05

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ВОСТОЧНЫХ РАЙОНОВ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Черных В.В., Яндола Н.И.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия

Аннотация. Приведены результаты комплексных гидрохимических исследований поверхностных вод восточных районов Новосибирской области. Проведена оценка территории с выделением районов, соответствующих нормативам качества воды, и районов с превышением ПДК загрязняющих веществ. Результаты исследования будут использованы при оценке качества природных вод в целях питьевого и хозяйственно-бытового использования.

Ключевые слова. поверхностные воды, гидрохимия, экологическое состояние, Новосибирская область.

Водные ресурсы являются основой жизнеобеспечения, они служат источником питьевого и промышленного водоснабжения, необходимы для функционирования промышленности и сельского хозяйства, именно поэтому особо остро стоит вопрос об их сохранении в условиях растущей антропогенной нагрузки. Наиболее интенсивному воздействию подвергаются водные объекты в черте городских агломераций, сопредельных территорий, в районах разработки месторождений полезных ископаемых и на территориях активного землепользования. Основными факторами загрязнения выступают сброс промышленных и бытовых сточных вод.

Целью настоящей работы является изучение химического состава поверхностных вод Новосибирской области, оценка их экологического состояния и потенциальных источников загрязнения. Промышленность Новосибирской области очень разнообразна и активно развивается. На территории области ведется разработка таких полезных ископаемых, как каменный уголь, тугоплавкие глины, торф, нефть. На северо-западе области открыты месторождения природного газа. В муниципальных районах и городских округах области функционируют предприятия всех отраслей экономики. В последние годы активно развиваются логистические центры – транспортные узлы авиа-, железнодорожного и автомобильного транспорта. В 18 из 30 муниципальных районов ведущей отраслью экономики является сельское хозяйство (Государственный доклад, 2024).

Восточная часть Новосибирской области обладает разветвленной речной сетью, включающей бассейны Оби, Ини, Берди и многочисленные малые реки и озера. Восток исследуемой территории приурочен к Кузнецкой ГСО и имеет весьма сложное гидрогеологическое строение (Максимова и др., 2013; Яндола и др., 2025; Novikov et al, 2025). В геологическом строении региона принимают участие отложения палеогена и неогена, которые перекрывают различные по составу и генезису породы складчатого фундамента раннедевонско-раннетриасового возраста. Также, широкое распространение имеют гранитоиды Приобского и Барлакского комплекса, прорывающие дислоцированные вулканогенно-осадочные толщи. В ландшафтном отношении это возвышенность Сокур, Буготакские сопки и Присалаирская предгорная равнина.

Фактическим материалом для настоящего исследования послужили результаты химико-аналитических исследований 284 проб вод поверхностных вод, отобранных во время полевых работ 2019–2025 гг. (рис. 1). В 2026 году исследования будут продолжены в левобережных районах реки Оби. Были выявлены превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) по многим химическим элементам. В соответствии с ГОСТом 12.1.007-76 они были разделены на классы опасности. В отобранных пробах были зафиксированы превышения по Mg (IV класс опасности), Al, Cr, Mn, Fe (III класс опасности), Na, Li, B, Si, As,

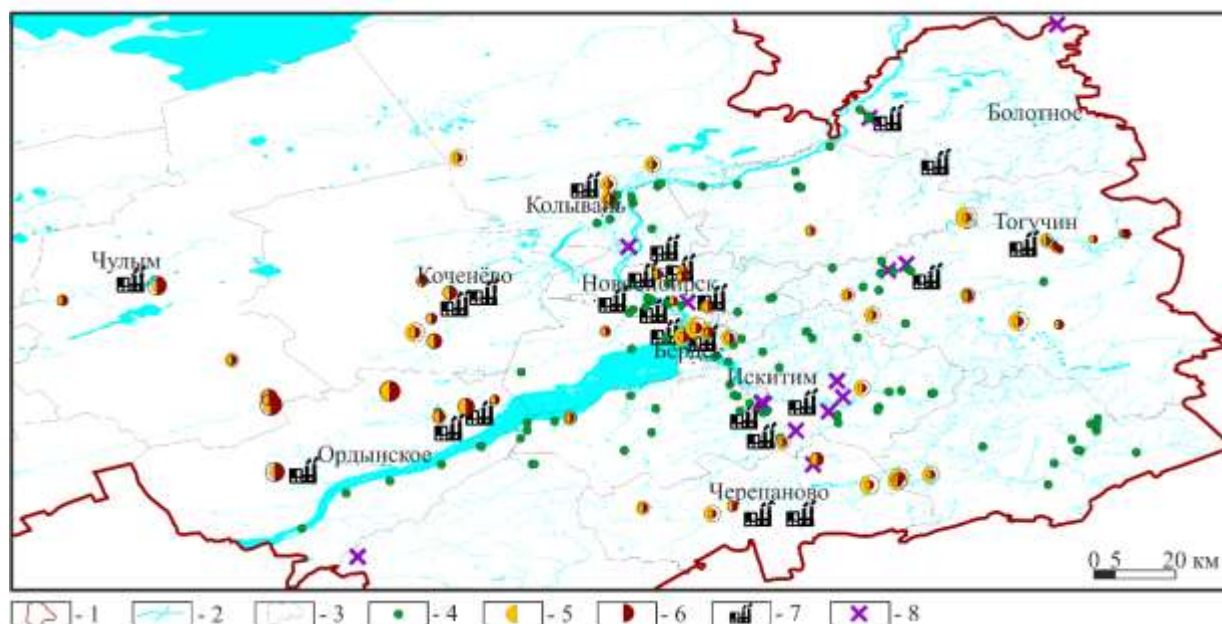


Рис. 1. Карта гидрохимических аномалий восточных районов Новосибирской области: 1 – границы Новосибирской области, 2 – гидросеть, 3 – границы районов области, 4 – чистые пробы, 5 – пробы с превышением ПДК по элементам IV и III класса опасности, 6 – пробы с превышением ПДК по элементам II и I класса опасности, 7 – промышленные предприятия, 8 – карьеры

I (II класс опасности), Be, U (I класс опасности). Оценка превышения ПДК выполнена в соответствии с нормами СанПиН 1.2.3685-21, 2.1.3684-21 и ГОСТ Р 51232-98.

Изученные пробы были разделены на 4 геохимические выборки, соответствующие разной степени загрязненности вод. Преобладают воды гидрокарбонатного кальциевого типа (46%) и гидрокарбонатного типа со смешанным катионным составом (42%), также установлены воды гидрокарбонатно-кальциевого типа со смешанным катионным составом (8%) и гидрокарбонатно-сульфатного типа (4%) со смешанным катионным составом (рис. 2а).

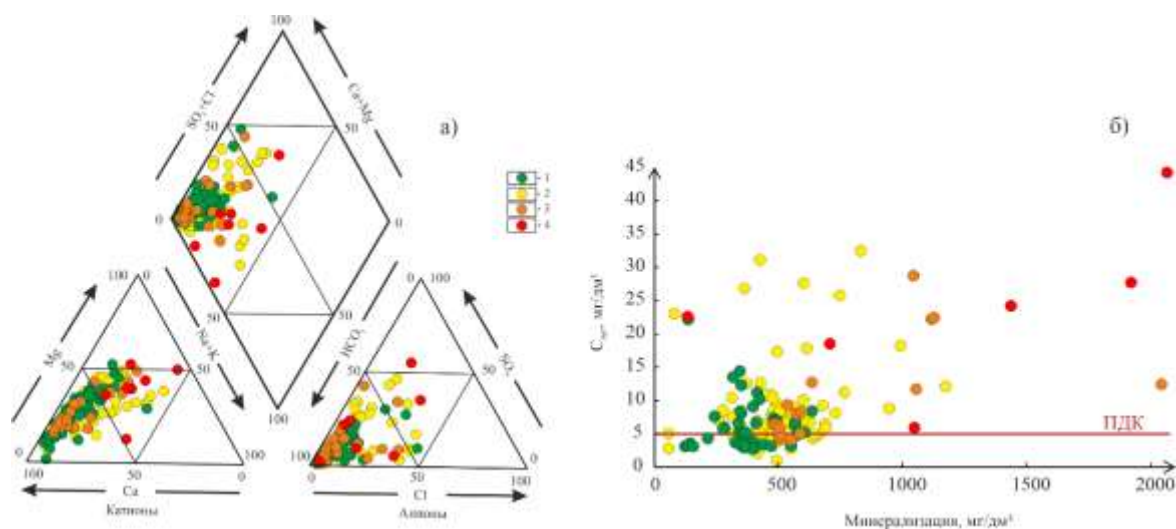


Рис. 2. Диаграмма Пайпера поверхностных вод (а) и зависимость $C_{орг}$ от величины общей минерализации (б): 1 – чистые воды; 2 – умерено загрязненные воды химическими элементами, 3 – высоко загрязненные воды химическими элементами, 4 – чрезвычайно загрязненные химическими элементами

К первой группе относятся чистые воды (113 проб), в них отсутствуют превышения ПДК по какому-либо химическому элементу и соединению. Большая часть вод принадлежит к гидрокарбонатному кальциевому составу. Значения минерализации лежат в диапазоне от 123.5 до 777 мг/дм³. Среднее значение водородного показателя соответствует 8.4 (слабощелочная вода), среднее значение Eh равняется +156 мВ.

Вторая группа (доминирующая выборка) включает в себя умеренно загрязненные воды (142 пробы). В пробах таких вод найдены незначительные превышения ПДК в основном по элементам III класса опасности – Al, Mn, Fe. Доминирующим остается гидрокарбонатный кальциевый состав воды, однако в отличие от первой группы появляются воды гидрокарбонатно-хлоридного и гидрокарбонатно-сульфидного типа со смешанным катионным составом. Среднее значение водородного показателя и Eh незначительно отличаются от показателей первой группы.

Воды третьей группы (22 пробы) имеют высокую степень загрязнения. Наблюдаются превышения ПДК по нескольким компонентам, преимущественно элементам II класса опасности – Na, Li, B, Si, As, Br, I, а также небольшие превышения по элементам I класса опасности – Be, U. Химический тип вод по-прежнему в большинстве случаев соответствует гидрокарбонатному кальциевому. Значения pH и Eh также не имеют особых отличий.

Чрезвычайно загрязненные воды относятся к четвертой группе (7 проб), зафиксированы значительные превышения ПДК сразу по нескольким элементам из разных классов опасности. В отличие от предыдущих групп, преобладают воды гидрокарбонатного натриевого состава со средними значениями водородного показателя – 8.75, Eh +94.7 мВ.

Также была проанализирована концентрация растворенных органических веществ ($C_{орг}$) в пробах (рис. 2б). Установлено, что при значении ПДК равном 5 мг/дм³, лишь в 17% проб содержание $C_{орг}$ не превышало допустимый уровень. Средняя концентрация органического углерода в поверхностных водах по всем пробам составила 8.5 мг/дм³. Наиболее высокие содержания $C_{орг}$ зафиксированы в пробах, отобранных на территории Тогучинского и Чулымского районов. Максимальное превышение ПДК отмечено в реке Карасук (Чулымский район), где концентрация $C_{орг}$ достигла 44.2 мг/дм³.

Из общего числа проб 113 (39.8%) соответствовали нормативам по всем анализируемым показателям, демонстрируя удовлетворительное качество. Пространственный анализ выявил четкую закономерность: районы с наиболее благополучным состоянием вод (Болотнинский, Сузунский), а также большинство чистых проб локализованы преимущественно на правом берегу р. Обь. В Искитимском, Маслянинском и Мошковском районах доля чистых проб высока, однако зафиксированы единичные случаи превышения ПДК по Al, Cr, Mn, Fe и As (в Мошковском районе дополнительно по Li).

Следующие по загрязненности поверхностные воды принадлежат Тогучинскому и Черепановскому районам. В большинстве отобранных проб фиксируются превышения ПДК по Fe, а также имеются превышения по Al, Cr, Mn, Li, Si, Черепановском районе найдено превышение Be.

Более напряженная экологическая обстановка характерна для левобережных районов. В Коченевском, Ордынском и Чулымском районах выявлены многочисленные пробы со значительными превышениями ПДК почти по всем анализируемым элементам. В Колывановском и Коченевском районах дополнительно обнаружены превышения по U, который относится к I классу опасности.

Новосибирская городская агломерация занимает третье место по численности населения в России. В городской черте действуют разные промышленные предприятия, поэтому в разных районах города степень антропогенной нагрузки различная. Ряд районов характеризуется загрязнением только за счет автомобильного транспорта. Примерно в равных количествах отобранные пробы оказались чистыми и загрязненными в разной степени. Так, наибольший уровень загрязнения зафиксирован в реке Пашенка (с. Сосновка) с большими концентрациями U и реке Ельцовка (Советский район г. Новосибирск). Наиболее

благополучными в экологическом отношении оказались водные объекты в Дзержинском и Кировском районах города ввиду того, что их значительные территории заняты парками и небольшими поселками с индивидуальными домовладениями.

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта № 25-17-20024 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области (№ 30-2025-000896).

Список литературы:

ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2007.

ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. – М.: Стандартинформ, 2008.

Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды новосибирской области в 2024 году / Министерство природных ресурсов и экологии Новосибирской области. – Новосибирск, 2025. 250 с.

Макимова А.А., Черных А.В., Новиков Д.А. и др. Токсичные элементы в подземных водах северных районов Обь-Зайсанской складчатой области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 5. С. 17–26.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021.

СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 28.01.2021 (с изменениями на 29 декабря 2025 г.).

Яндола Н.И., Новиков Д.А., Деркачев А.С. и др. Мышьяк в подземных водах правобережья р. Обь // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2025. № 3. С. 77–87.

Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., et al. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. 2021. Vol. 15. No. 100674.

УДК 556

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ БАЙДАРСКОЙ ДОЛИНЫ (КРЫМСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Яндола Н.И.^{1,2}, Новиков Д.А.^{1,2}, Дульцев Ф.Ф.^{1,2}, Бежин Н.А.²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия, YandolaNI@ipgg.sbras.ru

²Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Аннотация. В настоящей работе изучено распределение химических элементов в поверхностных водах юго-западной части Крымского полуострова с целью определения пригодности их использования для нужд хозяйственно-питьевого водоснабжения. Установлено, что концентрация большинства микро- и макрокомпонентов в пробах не превышает ПДК, однако в пробе из р. Календа наблюдаются значительные превышения содержания Mn, Fe, I и С_{орг}.

Ключевые слова: гидрогеохимия, поверхностные воды, Крым, Байдарская долина

Одним из основных источников воды для г. Севастополя и других населенных пунктов в юго-западной части Крымского полуострова является Чернореченское водохранилище, расположенное в Байдарской долине на охраняемой природной территории Государственный природный заказник регионального значения Республики Крым «Байдарский Заказник». В случае наступления продолжительного засушливого периода, г. Севастополь может пострадать от катастрофической нехватки питьевой воды, что уже случалось в конце 1980-х, начале 1990-х годов и 2020-2021 гг.

Так же нельзя не отметить все увеличивающуюся антропогенную нагрузку, связанную со строительством новых жилых домов на территории Байдарской долины. Согласно предложениям по генеральному плану развития Севастополя³³ на ближайшие годы, предполагается максимально возможное сохранение существующих природных ландшафтов и озелененных территорий, поэтому Байдарская долина остро нуждается в регулярном геоэкологическом мониторинге, чтобы не допустить загрязнения и/или уничтожения уникальных природных водных объектов и окружающих их ландшафтов.

В настоящей работе приведены результаты изучения природных водных объектов Байдарской долины. Исследования продолжают серию публикаций по изучению геохимических особенностей этого региона (Новиков и др., 2021а; Новиков и др., 2021б; Хвощевская и др., 2021; Новиков и др., 2022; Черных и др., 2025).

Исследуемая территория расположена на юго-западе Крымского полуострова, в границах Севастопольской городской агломерации (рис. 1). Изучение природных вод Байдарской долины ведется нашим коллективом с 2018 года. За это время было отобрано 79 проб природных вод (28 проб поверхностных вод из 11 объектов, рис. 1) в течение пяти полевых сезонов, в 2026 году исследования будут продолжены. Непосредственно на месте отбора проб происходило измерение значений рН, Eh, температуры, содержания растворенного O₂ и HCO₃⁻ при помощи мультипараметрового измерителя рН/ОВП/проводимости Hanna HI98195 и оксиметра Hanna HI98198. Лабораторное изучение химического состава проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М. Г. Курлова (более 10%-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему.

³³<https://genplanmos.ru/project/genplan-sevastopol/#genplan> (дата обращения 26.01.2026)



Рис. 1. Обзорная карта района исследований (а) и вид на Чернореченский каньон со стороны Байдарской долины (б)

1 – пункты отбора проб; 2 – населенные пункты; 3 – реки; 4 – граница г. Севастополя; 5 – охраняемые природные территории

Изученные воды пресные с минерализацией от 207 до 619 мг/дм³, гидрокарбонатные кальциевые и гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые с повышенным содержанием магния (рис. 2). Из общей картины резко выделяется проба из р. Черной, отобранная рядом с мостом близ Чернореченского каньона в 2019 г. В ее макрокомпонентном составе практически отсутствует кальций, а доминирующим ионом становится натрий. Стоит заметить, что анализ отобранной в том же месте пробы в 2022 г. показал совершенно обратный результат. Так же, пониженные содержания кальция наблюдаются в пробах, отобранных непосредственно из Чернореченского водохранилища и озера в с. Гончарное. В пробах из р. Ай-Тодорка в селе Терновка и озера из с. Черноречье наблюдаются повышенные (по сравнению с другими пробами) содержания Na (25.8 и 26.7 мг/дм³ при среднем 9 мг/дм³) и NO₃ (40 и 10.4 мг/дм³ при среднем 2.8). В пробе из р. Ай-Тодорка так же наблюдается значительно более высокое содержание фосфат иона (4.45 мг/дм³), при том, что его концентрации во всех остальных пробах незначительны или находятся ниже предела обнаружения. Вероятно, повышенные концентрации вышеперечисленных компонентов обусловлены использованием хорошо растворимой натриевой селитры в качестве удобрения, а для села Терновки вероятно так же использование суперфосфата в смеси с ней. В целом концентрации основных ионов не превышают (мг/дм³): HCO₃⁻ 440, SO₄²⁻ 44.6, Cl⁻ 36, Ca²⁺ 128, Mg²⁺ 12, Na⁺ 48.84, K⁺ 4.9. По водородному показателю воды слабощелочные и щелочные с pH от 7.5 до 8.9 с окислительной геохимической обстановкой (Eh +73 - +226) и содержанием O₂раств от 3.4 до 12.5 мг/дм³. Содержание C_{орг} колеблется от 0.5 до 25 мг/дм³, а величина перманганатной окисляемости составляет от 0.75 до 6.7 мг·О/дм³. Остановимся подробнее на распределении микрокомпонентов в изученных водах, где их концентрации превышают ПДК. В поверхностных водах Байдарской долины и ее окрестностей содержание практически всех из них не превышает предельно-допустимые концентрации, однако из общей картины резко выделяется р. Календа, где наблюдаются систематические превышения ПДК по Mn (29 раз), Fe (21 раз), Br (1.5 раза), I (6 раз) и C_{орг} (5 раз). Превышения марганца наблюдается так же в р. Черная и р. Байдарка, что связано с осаждением минералов Mn и уже освещалось в работе

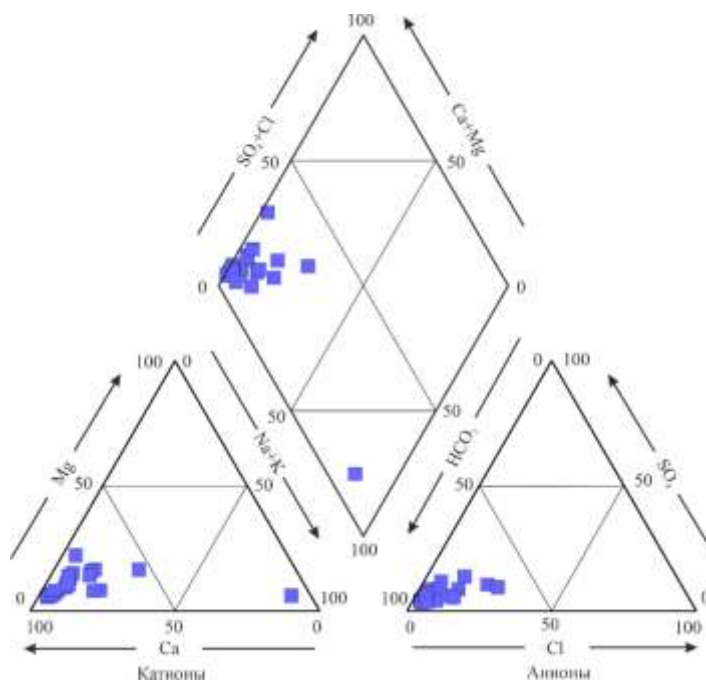


Рис. 2. Диаграмма Пайпера химического состава вод Байдарской долины

нашего коллектива (Вакуленко и др., 2023). Особое внимание в наших исследованиях уделено распределению радиоактивных элементов в природных водах и водовмещающих горных породах. Ранее, установлено, что в пределах Байдарской долины (Новиков и др., 2021) содержания урана и тория не представляют опасности для водопользования в широком смысле этого слова. Так, в подземных водах содержания урана составляют от $2.64 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³ до $2.25 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, тория от $2.04 \cdot 10^{-7}$ мг/дм³ и до $2.50 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³. В наибольшей степени ими обогащены региональной трещиноватости преимущественно натриевых алюмосиликатов. В изученных поверхностных водах радионуклидная нагрузка несколько ниже, концентрации урана могут достигать 0.015 мг/дм³, тория $2.5 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³. Это поведение урана и тория является закономерным, поскольку в окислительных геохимических обстановках уран обладает высокой миграционной способностью. Th/U отношение составляет от $5.4 \cdot 10^{-4}$ до $7,9 \cdot 10^{-2}$ в подземных водах и от $2.5 \cdot 10^{-4}$ до 0.47 в поверхностных водах. Обогащение поверхностных вод изучаемого региона ураном связано с засушливыми периодами года. Так, в соленых озерах Крымского полуострова, где величина общей минерализации может достигать до 323.5 г/дм³ его концентрации благодаря процессам солнечного концентрирования достигают до 0.016 мг/дм³.

Сравнительный анализ с действующими документами (ГОСТ, 1999; СанПиН, 2021a; СанПиН, 2021b) показал, что содержания основных макро- и микрокомпонентов в поверхностных водах Севастопольской городской агломерации не превышают предельно-допустимых концентраций. Воды всех изученных объектов, кроме р. Календа могут использоваться для целей хозяйственного-питьевого водоснабжения и относятся к высшей категории качества. Однако, в реках, протекающих в селах Терновка, и Черноречье, наблюдается повышенные концентрации Na, NO₃ и PO₄, что может быть связано с привносом этих компонентов из применяемых в земледелии удобрений. Чтобы сохранить уникальное качество вод Байдарской долины, необходимо регулярно проводить мониторинг их состояния и следовать рекомендациям Генерального плана Севастополя.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-43-02207, <https://rscf.ru/project/25-43-02207/>

Список литературы:

- Вакуленко Л.Г., Новиков Д.А., Черных А.В. и др. Марганцевое проявление реки Черной, как этап взаимодействия в системе вода-порода (Крымский полуостров) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами : Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С. Л. Шварцева, Томск, 16–21 октября 2023 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 4–8.
- ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества (дата введения 01.07.1999). Москва: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008. 21 с.
- Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Черных А.В. Новые изотопно-гидрогеохимические данные по составу природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров) // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 12. С. 1705–1726. DOI: 10.15372/GiG2020137.
- Новиков Д.А., Корнеева Т.В., Копылова Ю.Г. Первые данные о распределении урана и тория в природных водах Байдарской долины (Крымский полуостров) // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29. № 4. С. 461–471. DOI 10.15372/KhUR2021322.
- Новиков Д.А., Черных А.В., Хвощевская А.А. и др. Токсичные элементы в природных водах Севастопольской городской агломерации: распределение, фон, аномалии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 4. С. 79–92. DOI 10.18799/24131830/2022/4/3503.
- СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (от 28 января 2021 года, с изм. на 24 декабря 2025 года). Москва: Роспотребнадзор, 2021. 469 с.
- СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (от 28 января 2021 года с изменениями на 29 декабря 2025 года). Москва: Роспотребнадзор, 2021. 75 с.
- Хвощевская А.А. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г. Роль системы "вода-порода" в процессах формирования состава природных вод Севастопольской городской агломерации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 1. С. 118–128.
- Черных А.В., Козловская О.Н., Новиков Д.А., Хвощевская А.А. Особенности геохимии и экологическое состояние современных очагов разгрузки подземных вод юго-западной части Крымского полуострова // Устойчивое развитие горных территорий. 2025. Т. 17. № 2. С. 636–647. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-636-647.

СЕКЦИЯ 4. ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

УДК 504.455; 504.062.2

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ ЗАЛИВОВ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Баранова М.С., Обьедкова О.А., Филиппов О.В., Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С.,
Кучерова А.М.

Волжский филиал Волгоградского государственного университета, г. Волжский,
Волгоградская область, Россия, maria_baranova2902@rambler.ru

Аннотация. В статье проанализировано экологическое состояние отделенных заливов Волгоградского водохранилища и выявлены стадии их эволюционного развития. Большинство закрытых заливов характеризуются стадией стагнации экосистемы. Выявлено, что четкая зависимость между объемом, величиной общего солесодержания и годом отделения залива не прослеживается.

Ключевые слова: переформирование берегов, экосистема, деградация, заливы, Волгоградское водохранилище.

Создание водохранилищ на крупных равнинных реках приводит к масштабным изменениям природной среды, которые выражаются в изменении гидрологического режима главной реки и активизации геодинамических процессов. Особенно активно данные процессы проявляются на водохранилищах зоны аридного климата, к которым относится Волгоградское водохранилище. Климатические изменения последних десятилетий привели к видоизменению и активизации процесса переформирования берегов и к отрицательным последствиям для экосистемы водоема.

На Волгоградском водохранилище процесс переформирования берегов развивается более 60 лет. На озерном участке отмечается высокая интенсивность производных от размыва процессов: вдольберегового транспорта и седиментации наносов. Вдольбереговой перенос наносов инициировал отделение заливов от основной акватории водоема. В результате данного процесса единая экосистема водоема оказывается разобщенной; в заливах создаются условия лимнической экосистемы с признаками ее деградации. Поэтому целью настоящей работы стало определение стадии эволюционного развития отделенных заливов и степени их деградации.

Полевые методы исследования включают в себя: отбор проб воды на гидрохимический анализ, определение видового состава высшей водной растительности (Лисицына и др., 2009), визуальное описание экологического состояния залива. По стандартным методикам (Федеральный перечень...) проведен анализ содержания таких главных ионов, как кальций, магний, натрий и калий, хлориды, сульфаты, карбонаты, гидрокарбонаты, а также показатель pH и общее солесодержание. Отбор проб осуществлялся, в основном, в верховьях заливов, в заливах Ростовый, Короткий Липовый, Мордовский, Безымянный-1 – сразу за пересыпью.

Нами был рассчитан коэффициент деградации залива с учетом общего солесодержания, процента зарастания высшей водной растительностью, превышения нормативов качества воды по приведенным выше показателям, наличия других признаков деградации экосистемы (повышенное содержание отдельных ионов в воде, цветение воды, сильный запах сероводорода, заморные явления и др.) (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициент деградации закрытых заливов Волгоградского водохранилища.

Порядковый номер	Название залива, год отделения	Берег	Год последнего обследования	Коэффициент деградации
1	Безымянный-4, до 1986	Левый	2025	18.0
2	Безымянный-2, до 1986	Левый	2019	8.1
3	Ростовый, 2001	Правый	2020	7.4
4	Третий, 2002	Правый	2020	7.1
5	Короткий Липовый, 1991	Правый	2020	7.0
6	Крестищенская Балка, 1991	Правый	2019	5.2
7	Сгонная Балка, 2006	Правый	2013	5.0
8	Бахченний Овраг-2, до 1986	Правый	2019	4.7
9	Бахченний Овраг-1, 1991	Правый	2019	4.7
10	Суводский Яр, до 1986	Правый	2025	4.6
11	Жаркова, до 1986	Правый	2017	4.4
12	Мостовой, 1991	Правый	2014	4.2
13	Томатный, 2012	Правый	2012	3.7
14	Длинная Балка, до 1986	Правый	2013	3.7
15	Безымянный-1, 2016	Правый	2019	3.6
16	Длинный Липовый, 2006	Правый	2014	3.4
17	Бирючья Балка, 1991	Левый	2019	3.0
18	Другалка, 2018	Правый	2020	2.3
19	Большой, 2006	Правый	2019	2.2
20	Мордовский, 2020	Левый	2022	1.7

Не все заливы, изученные нами в ходе полевых исследований, имеют название. Поэтому, для удобства изложения результатов работы залив без названия в 3.5 км к северо-востоку от залива Крестищенская Балка был назван нами *Безымянный-1*, залив без названия в 0.7 км к северу от залива Карагачева Балка – *Безымянный-2*, залив без названия в 0.8 км к северу от залива Карагачева Балка – *Безымянный-4*.

Экологические последствия отделения изученных заливов водоема и признаки их деградации были подробно приведены в ряде ранее опубликованных работ (Объедкова и др., 2021; Баранова, 2025 и др.). В настоящей статье с учетом анализа всех перечисленных выше показателей мы вычислили коэффициенты деградации заливов и определили стадии их эволюционного развития.

Отметим, что содержание отдельных показателей в воде закрытых заливов в период 2011–2025 гг. из года в год варьирует, что указывает на влияние грунтовых вод:

- общее солесодержание – от 136.00 до 3506.34 мг/дм³;
- показатель pH – от 6.97 до 9.60 (слабощелочная среда);
- сульфаты – от 4.17 до 153.21 мг/дм³;
- хлориды – от 30.13 до 972.12 мг/дм³;
- гидрокарбонаты – от 89.24 до 1311,30 мг/дм³;
- ионы кальция – от 23.25 до 160.32 мг/дм³;
- ионы магния – от 6.08 до 121.50 мг/дм³;
- ионы натрия и калия (суммарно) – от 37.9 до 932.04 мг/дм³;
- железо общее – от 0.05 до 0.90 мг/дм³.

В закрытых заливах отмечено превышение нормативов качества воды по показателю pH, содержанию сульфатов, хлоридов, ионов магния, ионов натрия и калия (суммарно), железа общего; часто отмечается повышение общего солесодержания.

Заливы, отделенные до 1986 г. и в 1991 г., отличаются повышенным содержанием отдельных ионов и увеличением общего солесодержания в отдельные годы от 1.1 до 10 раз. При вскрытии грунта, в таких заливах чувствуется сильный запах сероводорода. Повышение летних температур в последние десятилетия приводит к сильному прогреву водной массы мелководных закрытых заливов, что отрицательно сказывается на их экосистемах (создаются условия для вегетации высшей водной растительности, сильное цветение воды, в некоторых случаях - прогрев водной массы до дна).

Акватории закрытых заливов активно зарастают высшей водной растительностью (в большинстве случаев от 40 до 94% площади залива). Среди погруженных гидрофитов преобладает роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.) с отдельными группами рдеста пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus* L.), рдеста блестящего (*Potamogeton lucens* L.), урути колосистой (*Myriophyllum spicatum* L.). Гидрофиты со свободно плавающими на воде листьями представлены ряской трехдольной (*Lemna trisulca* L.), многокоренником обыкновенным (*Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid.), водокрасом лягушачьим (*Hydrocharis morsus-ranae* L.), сальвинией плавающей (*Salvinia natans* (L.) All.). Среди гелофитов доминируют формации тростника высочайшего (*Phragmites altissimus* (Benth.) Nabile), тростника южного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.).

Наибольшие изменения произошли в заливе Безымянный-4 (исследования 2025 г.). Общее солесодержание в воде залива составляет более 3500 мг/дм³ (при нормативах для волжских вод – 350 мг/дм³; превышение более, чем в 10 раз). Отмечено превышение ПДК содержания в воде залива хлоридов, сульфатов, ионов натрия и калия (суммарно), ионов магния. В заливе повышенное содержание гидрокарбонатов. Заращение акватории составило 94%. Коэффициент деградации больше, чем в 2 раза превышает коэффициенты для последующих объектов (см. табл. 1).

Заливы с коэффициентом ≥ 7 являются наиболее деградировавшими в эволюционном развитии, в них завершается переход от стадии стагнации к стадии перерождения в болотную экосистему. Процесс перехода близок к завершению в заливе Безымянный-4.

Заливы с коэффициентом от 3 до 7 характеризуются стадией стагнации экосистемы.

В экосистемах заливов с коэффициентом ≤ 3 произошли наименьшие изменения, что характеризует переход от стадии стабилизации к стадии стагнации. Такие заливы или сохраняют достаточный объем (Большой, Бирючья Балка), или были отделены недавно (Мордовский, Другалка).

Для закрытых заливов нами был рассчитан коэффициент корреляции и установлена сила связи между объемом залива, общим солесодержанием, годом отделения и процентом зарастания (табл. 2). Между объемом залива, годом его отделения и общим солесодержанием связь слабая. Между объемом залива и процентом зарастания его акватории наблюдается средняя обратная связь с коэффициентом корреляции -0.7 .

Таблица 2. Сила связи отдельных показателей в закрытых заливах.

№ п/п	Показатель 1	Показатель 2	Коэффициент корреляции	Сила и характер связи
1	Объем залива	Общее солесодержание	-0.30	Слабая обратная
2	Первоначальный объем залива (1958 г)	Год отделения	0.46	Слабая прямая
3	Год отделения	Общее солесодержание	-0.29	Слабая обратная
4	Объем залива	Процент зарастания	-0.69	Средняя обратная

В результате выполненного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Большинство закрытых заливов характеризуются стадией стагнации экосистемы. В некоторых из них завершается переход от стадии стагнации к стадии перерождения в болотную экосистему.

2. Закрытые заливы в условиях повышения летних температур последних десятилетий быстро проходят в эволюционном развитии путь от стадии стабилизации к стадии стагнации и перерождения экосистемы в болотную.

3. В отделенных заливах не прослеживается зависимость между объемом, величиной общего солесодержания и годом отделения, что подтверждает многофакторность процесса отделения и эволюционного развития залива.

4. С уменьшением объема увеличивается площадь мелководной зоны, что, в свою очередь, способствует быстрому зарастанию акватории залива высшей водной растительностью (средняя сила связи с коэффициентом корреляции -0.7).

Список литературы:

Баранова М.С. Экологические последствия отделения заливов озерного участка Волгоградского водохранилища // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 29 мая – 01 июня 2025 года. Пермь: ПГНИУ, 2025. С. 413–417.

Лисицына Л.И., Папченков В.Г., Артеменко В.И. Флора водоемов Волжского бассейна. Определитель сосудистых растений. М., 2009. 219 с.

Объедкова О.А., Баранова М.С., Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Филиппов О.В. Особенности минерального состава воды заливов Волгоградского водохранилища в пределах Волгоградской области // Проблемы устойчивого развития и экол.-экон. безопасности регионов: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конференции, г. Волжский, 25-26 ноября 2021 г. Волгоград: Издательство Сфера. 2021. С. 172–178.

РД 52.18.595-96 Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5). [Электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200036098> (дата обращения: 12.09.2025)

УДК 551.435.1

ХАБАРОВСКОЕ РАЗВЕТВЛЕНИЕ РЕКИ АМУР: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА

Буркова А.А.

Институт водных и экологических проблем – обособленное подразделение Хабаровского
федерального исследовательского центра ДВО РАН, Хабаровск, Россия,
anna.byrkova@yandex.ru

Аннотация. Охарактеризована динамика русловых деформаций р. Амур в пределах Хабаровского пойменно-руслового разветвления. Установлено, что расширение протоки Пемзенской способствовало активной аккумуляции наносов в главном русле р. Амур, что осложняет ведение хозяйственной деятельности в районе города.

Ключевые слова: река Амур, многорукавное русло, русловые процессы, перераспределение стока.

Река Амур в нижнем течении на значительном протяжении имеет многорукавное русло со сложными разновидностями пойменно-русловых разветвлений (Чалов, 2023). Одним из наиболее обширных является Хабаровское разветвление, развитие которого оказывает существенное влияние на хозяйственную деятельность в районе города. Направленное перераспределение стока воды во второстепенные рукава привело к активизации ряда негативных последствий, в частности, к избыточной аккумуляции наносов в основном русле, что осложняет судоходство и работу городского водозабора (Бортин и др., 2020; Махинов, 2019). В связи с этим, необходим постоянный мониторинг эрозионно-аккумулятивных процессов на данном участке для выявления направленности и интенсивности русловых деформаций с целью прогнозирования изменений состояния реки.

Главное русло р. Амур в районе г. Хабаровска образует крутую излучину, верхнее крыло которого ограничено пойменными берегами островов Большой Уссурийский, Дачный и Кабельный и находится в условиях свободного протекания русловых процессов (рис. 1). Нижнее крыло излучины примыкает к коренному правому берегу, сложенному прочными скальными породами хабаровской свиты пермской системы, что ограничивает развитие русловых деформаций в сторону правобережья (Буркова, Махинов, 2025).



Рис. 1. Хабаровское пойменно-русловое разветвление р. Амур

Анализ разновременных карт и космических снимков показал, что до 1940-х годов спрямляющая излучину главного русла протока Пемзенская отсутствовала. В период 1945–1975 годов происходило увеличение кривизны меандра вследствие размыва левого берега в районе истока протоки Бешеной, эрозии берега о. Большой Уссурийский и аккумуляции наносов вдоль выпуклого берега в вершине излучины, что привело к ее прорыву и образованию Пемзенской протоки.

На момент 1975 г. протока Пемзенская еще не получила существенного развития, ее ширина в районе истока составляла 312 м (ширина протоки Бешеной – 264,5 м). Главное русло Амура достигало ширины 1,5–2,5 км, в его пределах располагалось шесть небольших островов общей площадью 1,33 км², два из которых были частично закреплены растительностью (рис. 2). Интенсивное развитие протоки Пемзенской в последующие 25 лет привело существенному снижению водности главного русла реки Амур. К 2003 году в верхнем крыле излучины сформировалось несколько крупных островов суммарной площадью 3,02 км², один из которых (площадью 0,87 км²) причленился к левому берегу главного русла ниже истока протоки Пемзенской.

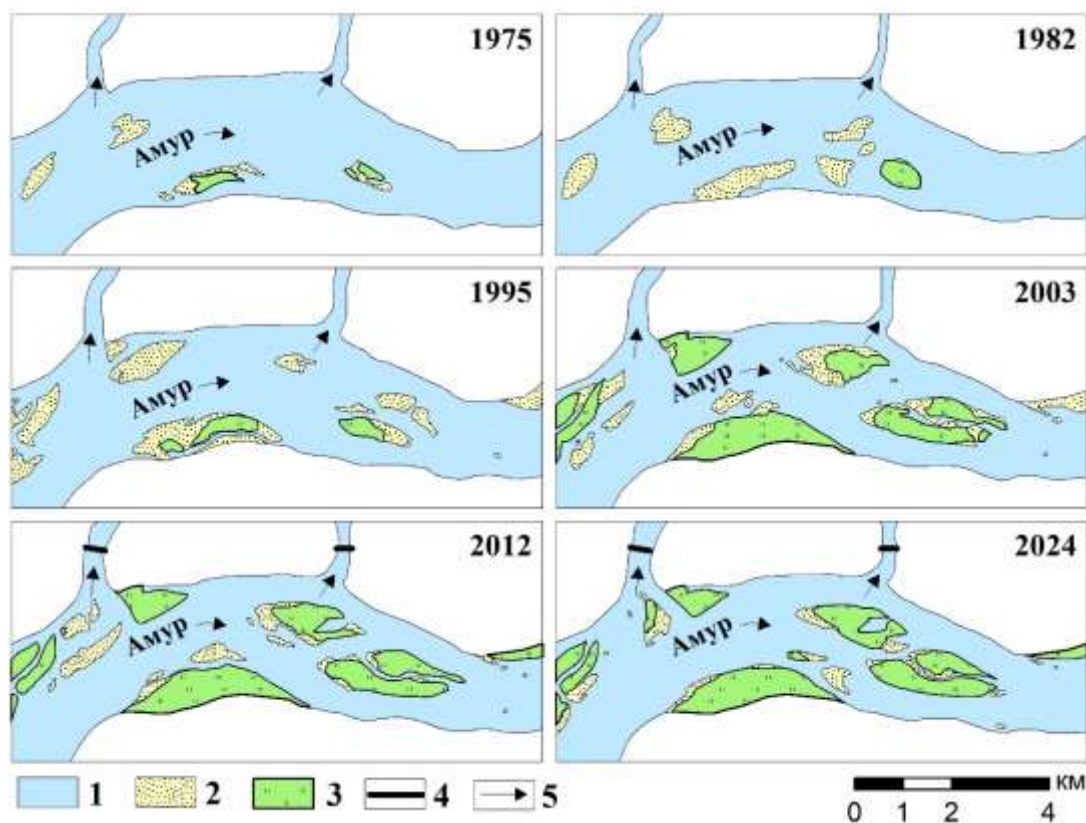


Рис. 2. Аккумуляция в главном русле р. Амур в пределах верхнего крыла излучины в период 1975–2024 гг.

1 – водное зеркало; острова, осередки и побочни: 2 – незакрепленные растительностью, 3 – закрепленные растительностью; 4 – переливные плотины, 5 – направление течения

К 2005 г. ширина протоки Пемзенской достигла 400–450 м, что привело к существенному перераспределению стока воды между рукавами. В протоку стало уходить до 55–65% всего объема стока, что сопровождалось снижением доли стока в главном русле до 30–40% (табл. 1). Сток в протоку Бешеную находился на уровне 5–7%.

Таблица 1. Доля стока воды в главном рукаве реки Амур в период 2000–2023 гг. в районе г. Хабаровска.

Год	2000	2005	2012	2023
Доля стока, %	42.6	31.5	65.0	55.0

Развитие спрямляющих протоков (главным образом, Пемзенской) существенно снизило транспортирующую способность потока в главном русле и активизировало процессы аккумуляции наносов. Если в 1975 г. суммарная площадь островов составляла 1.33 км², то в начале 2000-х площадь аккумулятивных образований увеличилась более чем на 5.5 км² – из них около 3 км² приходилось на острова, остальное – массивы, причленившиеся к островам Большой Уссурийский, Дачный и Кабельный.

В 2005–2006 гг. с целью предотвращения негативных последствий перераспределения стока во второстепенные рукава протоки Пемзенская и Бешеная были перекрыты переливными плотинами, сложенными крупнообломочным каменным материалом (Махинов и др., 2016). Благодаря проведенным гидротехническим работам сток воды в главное русло увеличился до 65%.

Переливные плотины успешно выполняли свои функции до катастрофических паводков 2013 и 2019–2021 годов, в результате которых активизировался размыв правого берега протоки Пемзенской (Махинов и др., 2020). Это привело к образованию глубокого обходного канала шириной 60–100 м в районе плотины, который продолжает расширяться, что обуславливает возобновившееся перераспределение стока из главного русла. Современные темпы отступления берега и расширения протоки в сторону правобережья составляют порядка 5 м/год.

Следует отметить, что ни строительство плотин, ни крупные паводки 2013 и 2019–2021 годов существенно не повлияли на конфигурацию островов, но снизили темпы накопления наносов – площадь аккумулятивных образований в период с 2012 по 2024 годы увеличилась всего на 0.2 км². Однако дальнейшее перераспределение стока в протоку Пемзенскую может привести к увеличению интенсивности аккумуляция наносов в главном русле Амура, что существенно осложнит хозяйственную деятельность в акватории и на берегах реки в районе г. Хабаровска.

Список литературы:

- Бортин Н.Н., Милаев В.М., Горчаков А.М. Влияние природных и антропогенных факторов на пропускную способность русла реки Амур у города Хабаровска при прохождении паводков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 66–82. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-5
- Буркова А.А., Махинов А.Н. Русловые процессы и перераспределение стока воды между рукавами в пойменно-русловых разветвлениях крупных рек // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2025. № 4 (89). С. 189–199. DOI: 10.37724/RSU.2025.89.4.019
- Махинов А.Н. Негативные тенденции в развитии русловых процессов рек бассейна Амура и их последствия // Научные проблемы оздоровления Российских рек и пути их решения. 2019. С. 189–195.
- Махинов А.Н., Завадский А.С., Ким В.И., Чернов А.В., Губарева Е.К. Изменение русла реки Амур после наводнения 2013 года // Известия РГО. 2016. Т. 148. № 3. С. 46–61.
- Махинов А.Н., Ким В.И., Матвеев Д.В. Геоморфологические последствия наводнений на реке Амур и устойчивость гидротехнических сооружений // VIII Щукинские чтения: рельеф и

природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Москва, 28 сентября – 01 октября 2020 года. 2020. С. 96–100.

Чалов Р.С. Пойменно-русловые разветвления: условия формирования и гидролого-морфологическая характеристика // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78. № 2. С. 10–21. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.2

УДК 556

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНДОВ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ СТОКА В БАССЕЙНЕ Р. КАМЫ

Возняк А.А.

Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов, Камский филиал, г. Пермь, Россия

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, Россия

Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Россия

aavoznyak@gmail.com

Аннотация. Исследованы тренды многолетних колебаний среднегодового, максимального и минимального стока на реках Камского бассейна. Показано, что параметры трендов (угол наклона и знак) определяются началом периода наблюдений каждого конкретного гидрологического ряда. Получены данные, что влияние климатических изменений на параметры трендов стока в разных природных зонах, но в рамках одного речного бассейна, может иметь противоположные знаки.

Ключевые слова: тренды многолетних колебаний стока, бассейн реки Камы.

Тренды в рядах наблюдений стока рек начали обсуждаться с начала XXI века (Водные ресурсы России..., 2008; Лавров, Калужный, 2012; Лобанова и др., 2015, Осипова, Филиппова, 2016). В этих исследованиях было показано, что за последние четверть века произошло увеличение средних зимних температур воздуха, вследствие чего наблюдается существенное увеличение минимального зимнего стока и значительное снижение максимальных расходов половодья, в первую очередь, в бассейнах рек европейской части РФ. Нам в 2016 г. пришлось заниматься уточнением НДС для участка Верхней Камы от пгт Тюлькино до г. Березники, соответственно, предметом исследований были только зимние расходы, так как минимальные среднемесячные расходы воды, необходимые для расчета НДС, приходятся в этом районе на зиму. Наши выводы совпали с исследованиями других ученых: зимние расходы на р. Каме, действительно, выросли. При этом, была подмечена особенность, что годовые и среднемесячные расходы 95% обеспеченности существенно меняются в зависимости от того, с какого года используются ряды наблюдений.

Позже, при разработке Правил использования водохранилищ (ПИВ) рассчитывались уже величины расходов малых обеспеченностей (от 0.01 до 5%). И отмеченная выше особенность проявилась вновь, только уже для другой области кривой распределения. При этом, максимальные расходы половодья имели отрицательный тренд только в случае, если использовались ряды наблюдений с 1990-х годов. Если же использовать полные ряды наблюдений, то тренды у максимальных расходов в бассейне р. Камы – положительные, особенно, если начало наблюдений у гидрологических постов приходится на 1930-е годы (самое маловодное десятилетие XX века).

Естественно, возникли вопросы: как начало периода наблюдений отражается на величине тренда многолетних колебаний стока? Сохраняется ли тенденция, рассчитанная по рядам с 1930-х годов, при использовании другого, более длительного периода наблюдений?

Таким образом, цель настоящей работы – оценить тренды среднегодового, максимального и минимального стока рек бассейна р. Камы, посмотреть, как они изменяются в зависимости от даты начала наблюдений. Разобраться в тенденциях трендов стока является достаточно важной задачей ввиду долгосрочного прогнозирования запасов водных ресурсов. В настоящее время все озабочены значительной нехваткой водных ресурсов в стране. Исследование трендов стока может показать, это необратимые изменения или просто очередной маловодный период, который вскоре сменится многоводным.

Для исследования влияния даты начала наблюдений и продолжительности ряда были выбраны ряды с самым продолжительным периодом наблюдений. Их в бассейне р. Камы оказалось 7. В таблицах 1–4 представлены угловые коэффициенты трендов, отражающие наклон кривой (тенденцию), для всех семи створов и для всех разновидностей стока: среднего, максимального, минимального. Необходимо отметить, что тренды для всех разновидностей стока строились для величин модулей стока. Для расходов знак тенденции сохранится, но значение коэффициента будет много больше.

Таблица 1. Угловые коэффициенты трендов среднегодового модуля стока.

Река–пункт	Начало наблюдений	Угловой коэффициент тренда				
		С начала	С 1931	С 1951	С 1975	С 1990
Белая–Уфа	1878	-0.005	0.007	-0.003	-0.027	-0.121
Кама–Бондюг	1911	0.013	0.024	0.013	0.004	-0.019
Вишера–Митракова/Рябинино	1902	0.036	0.068	0.024	0.080	0.099
Чусовая–Копчик/Кын	1882	-0.001	0.020	-0.001	0.002	-0.144
Чусовая–Лямино	1882	0.005	0.026	0.005	0.020	-0.097
Кама–Березники/Тюлькино	1881	0.013	0.035	0.013	0.023	0.012
Вятка–Киров	1878	0.001	0.032	0.001	0.028	-0.009

Таблица 2. Угловые коэффициенты трендов модуля максимального стока весеннего половодья.

Река–пункт	Начало наблюдений	Угловой коэффициент тренда				
		С начала	С 1930	С 1951	С 1975	С 1990
Белая–Уфа	1878	-0.181	-0.155	-0.256	-0.359	-0.943
Кама–Бондюг	1911	0.159	0.269	-0.078	-0.237	-0.553
Вишера–Митракова/Рябинино	1902	0.286	0.410	0.481	0.435	-0.049
Чусовая–Копчик/Кын	1882	0.056	0.326	0.139	-0.327	-1.804
Чусовая–Лямино	1882	0.066	0.506	0.496	0.109	-1.346
Кама–Березники/Тюлькино	1881	0.052	0.187	0.084	0.023	-0.214
Вятка–Киров	1878	0.026	0.136	0.088	-0.046	-0.528

Таблица 3. Угловые коэффициенты трендов модуля минимального среднемесячного зимнего стока.

Река–пункт	Начало наблюдений	Угловой коэффициент тренда				
		С начала	С 1930	С 1950	С 1975	С 1990
Белая–Уфа	1878	0.010	0.020	0.017	-0.002	-0.037
Кама–Бондюг	1911	0.009	0.012	0.014	0.013	0.014
Вишера–Митракова/Рябинино	1902	0.012	0.019	0.023	0.029	0.036
Чусовая–Копчик/Кын	1882	0.006	0.007	0.006	-0.006	-0.030
Чусовая–Лямино	1882	0.004	0.007	0.007	-0.007	-0.025
Кама–Березники/Тюлькино	1881	0.005	0.014	0.018	0.020	0.020
Вятка–Киров	1878	0.001	0.015	0.018	0.010	-0.010

Таблица 4. Угловые коэффициенты трендов модуля минимального среднемесячного летнего стока.

Река–пункт	Начало наблюдений	Угловой коэффициент тренда				
		С начала	С 1930	С 1950	С 1975	С 1990
Белая–Уфа	1878	0.0	0.011	0.014	0.0	-0.038
Кама–Бондюг	1911	0.009	0.013	0.008	-0.004	0.073
Вишера–Митракова/Рябинино	1902	0.016	0.046	0.044	0.037	0.131
Чусовая–Копчик/Кын	1882	-0.002	0.016	0.019	0.003	-0.051
Чусовая–Лямино	1882	-0.002	0.013	0.022	-0.006	-0.033
Кама–Березники/Тюлькино	1881	0.011	0.025	0.018	0.009	0.083
Вятка–Киров	1878	0.0	0.016	0.018	-0.003	-0.006

Для всех таблиц (и, соответственно, трендов) достаточно ярко выделяется очевидная закономерность: при использовании ряда с началом в маловодный период угловой коэффициент резко возрастает, при использовании ряда с началом в многоводный период (это в бассейне р. Камы 1990-е годы) угловой коэффициент резко уменьшается, становится существенно отрицательным.

Что касается общих закономерностей в рядах годового стока, то данные таблицы 1 показывают уменьшение водных ресурсов на 8% только в бассейне р. Белой, в районе Верхней Камы и р. Вишеры – общее увеличение водных ресурсов на 20%, в бассейнах р. Чусовой и р. Вятки изменений практически нет (не более 1%). Таким образом, влияние изменения климата проявляется по-разному в разных природных зонах: в северной лесной (Верхняя Кама) и горнолесной (Вишера) зонах среднегодовой сток увеличился, в степной зоне (хотя верховья р. Белой расположены в горнолесной зоне) сток уменьшился, в зоне умеренного климата – не изменился. Необходимо отметить, что уменьшение стока в бассейне р. Белой могут быть обусловлены не только изменением климата, а, в большей степени, антропогенным влиянием. Во второй половине XX века выше расчетного створа на р. Белой были созданы 3 достаточно крупных водохранилища (Павловское, Нугушское, Юмагузинское) и появился мощный промышленный узел (Стерлитамак, Ишимбай, Салават), из-за чего уменьшается годовой сток (из-за увеличения испарения и значительного водопотребления), значительно снижаются (срезаются) максимальные расходы весеннего половодья, что подтверждает табл. 2, и увеличиваются летние меженные расходы. Табл. 4 не показывает увеличения расходов летней межени в бассейне р. Белой, но не показывает и уменьшения, летние расходы остались на прежнем уровне несмотря на уменьшение годового стока. Явно прослеживается влияние регулирования стока.

В трендах максимального стока половодья полностью повторяется картина с трендами годового стока. Существенное уменьшение максимальных расходов (на 30%), причем независимо от даты начала наблюдений, наблюдается только на р. Белой. Возможно, как уже было указано выше, это влияние водохранилищ. Среднее увеличение максимальных расходов наблюдается в районе Верхней Камы и р. Вишеры, причем в горнолесной зоне р. Вишеры на 22%, а в северно-лесной р. Каме – на 11%. Максимальный сток на реках умеренной зоны рр. Чусовой и Вятки увеличился за 140 лет незначительно, менее 5%. При этом явно наблюдается на отдельных реках с 1975 г. и на всех – с 1990 г. существенная тенденция снижения максимальных расходов половодья. Тенденция роста, заметная при использовании полных 140-летних рядов, позволяет надеяться, что это снижение максимальных расходов в последние 30 лет не является безвозвратным.

Анализ трендов минимального зимнего стока по полным рядам наблюдений с конца XIX века подтверждает выводы исследований с 2008 по 2016 годы (Водные..., 2008; Лавров, Калужный, 20012; Лобанова и др., 2015, Осипова, Филиппова, 2016): зимний сток увеличился

во всех природных зонах. Однако в последние 30 лет тренд имеет отрицательный знак, что, как уже упоминалось, характерно при построении тренда с началом ряда в многоводный период. Это очень важный вывод для тех, кто рассчитывает НДС. НДС действуют 5 лет. Какой период брать для расчета? Если использовать полный ряд, то НДС будут значительно меньше, то есть больше проблем у предприятий. Зачем брать старые значения НДС, если минимальные зимние расходы в последние 30 лет увеличились на 20-30% на р. Каме, на 40-70% на р. Чусовой и на 56% на р. Белой?

Тренды летних минимальных среднемесячных расходов воды имеют очень пеструю картину. В северной части бассейна р. Камы (Верхняя Кама и Вишера) наблюдается существенный (на 20–26%) рост летних расходов. В западной (р. Вятка), юго-восточной (р. Чусовая) и южной (р. Белая) частях бассейна, наоборот, по полным рядам наблюдается незначительное уменьшение летних расходов: рр. Вятка и Белая – менее 1%, р. Чусовая – 2–5%. Все-таки, изменения климата в разных природных зонах оказывают разные воздействия.

Таким образом, анализ трендов разных видов стока с изменением продолжительности ряда показал, что год начала наблюдений оказывает огромное влияние на величину и знак тренда многолетних колебаний. Попадание начала наблюдений на маловодный или многоводный период может существенно исказить картину тенденций изменения водных ресурсов, что весьма важно при построении перспективных планов водопользования.

При расчетах максимальных обеспеченных расходов (разработка ПИВ и другие проектные работы) для обеспечения безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений важно использовать максимальную длину рядов наблюдений, особенно в районах, где отмечается существенное снижение максимальных расходов воды в последние 30-40 лет.

При расчетах НДС и других кратковременно действующих нормативов, наоборот, есть смысл использовать последние 30–40 лет для снижения необоснованной нагрузки на промышленные предприятия. А вырученные средства будут направлены на возрождение и сохранение окружающей среды вокруг предприятия.

Список литературы:

- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И. А. Шикломанова. СПб., 2008. 600 с.
- Лавров С.А., Калюжный И.Л. Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата // Водные ресурсы. 2012. № 4. С. 74–84.
- Лобанова А.Г., Гуревич Е.В., Георгиевский Д.В., Грек Е.А., Молчанова Т.Г., Шалашина Т.Л. Особенности расчета основных гидрологических характеристик в условиях их временной нестационарности // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Труды Четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. М.: ИВП РАН, 2015. С. 313–315.
- Осипова Н.В., Филиппова И.А. Оценка расчетных значений гидрологических характеристик методом совместного анализа Крицкого-Менкеля в нестационарных условиях // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 3. С. 69–80.

УДК 911.52

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОДВОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПОД ВЛИЯНИЕМ АНТРОПОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Дудакова Д.С., Анохин В.М.

Институт озероведения РАН-СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия, *judina-d@yandex.ru*

Аннотация. Наиболее существенные изменения донных ландшафтов под влиянием антропогенной деятельности в прибрежной зоне Ладожского озера вызываются предприятиями лесопромышленного комплекса, объектами садковой аквакультуры и при загрязнении дна твердыми бытовыми отходами. Целью работы было оценить возможности использования дистанционных методов и картографирования для оценки масштабов воздействия основных источников загрязнения. Представлены результаты картографирования акватории вблизи ЦБК и в зоне размещения садкового хозяйства на Ладожском озере.

Ключевые слова: подводные ландшафты, крупномасштабное картографирование, тестовые полигоны, антропогенная трансформация дна, шлам-лигнин, отходы ЦБК, садковые хозяйства

Наиболее существенные изменения состояния донных ландшафтов в Ладожском озере выявляются в прибрежной зоне, имеющей наибольшую структурную сложность и несущую признаки экотона (Литоральная зона..., 2011). Для Ладожского озера основными источниками антропогенного воздействия, снижающими качество среды, являются сточные воды и твердые отходы предприятий лесопромышленного комплекса, привнос органического вещества от объектов садковой аквакультуры, загрязнение дна бытовыми отходами (Дудакова, Анохин, 2025; Поздняков и др., 2021). Исследования, проводимые для оз. Байкал, показали, что наряду с высоким потреблением кислорода, повышенным содержанием взвешенных веществ, азота и фосфора, образованием хлорированных органических соединений (в т.ч. диоксинов, фуранов и других абсорбируемых органических галогенидов), в результате деятельности ЦБК образуется большое количество твердых отходов, которые выбрасываются на свалки: шлам-лигнин, известковый шлам, зола и твердые коммунальные отходы (Zvereva et al., 2022). Наши предыдущие работы, посвященные исследованиям воздействия форелевых хозяйств на акватории Ладожского озера, также показали, что происходит значительное изменение как химических характеристик донных отложений (с повышением содержания биогенных и загрязняющих веществ), так и перестройки биологических сообществ (Lapenkov et al., 2024). При этом также значительно меняется облик донных ландшафтов под садками и вокруг них (Dudakova et al., 2024).

Целью настоящей работы является оценка возможности использования дистанционных методов и картографирования для учета масштабов воздействия (пространственных аспектов трансформации дна) объектов садковой аквакультуры и предприятий лесопромышленного комплекса на состояние донных ландшафтов.

Для реализации поставленной цели было выбрано два тестовых участка в акватории Ладожского озера: садковое хозяйство в заливе Мусталаhti (в шхерах Якимварского залива) у г. Лахденпохья и прибрежный участок вблизи Питкярантского ЦБК (рис. 1А). Исследования проводились для первого – в конце июля 2024 г., для второго – в начале июля 2025 г. Для получения данных для дальнейшего ландшафтного картографирования использовался комплекс дистанционных методов: подводная видеосъемка необитаемым подводным аппаратом (НПА) Limnoscout и гидроакустическая съемка эхолотом с функцией гидролокации бокового обзора (ГЛБО) Hummingbird SOLIX 10 SI MEGA CHIRP. Для анализа береговой зоны, участков зарастания макрофитами и особенностей береговой линии при составлении ландшафтной схемы применялись спутниковые снимки видимого диапазона Google Earth, а также фотокадры с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) Phantom 2, полученные для исследуемых районов в 2013–2014 гг.

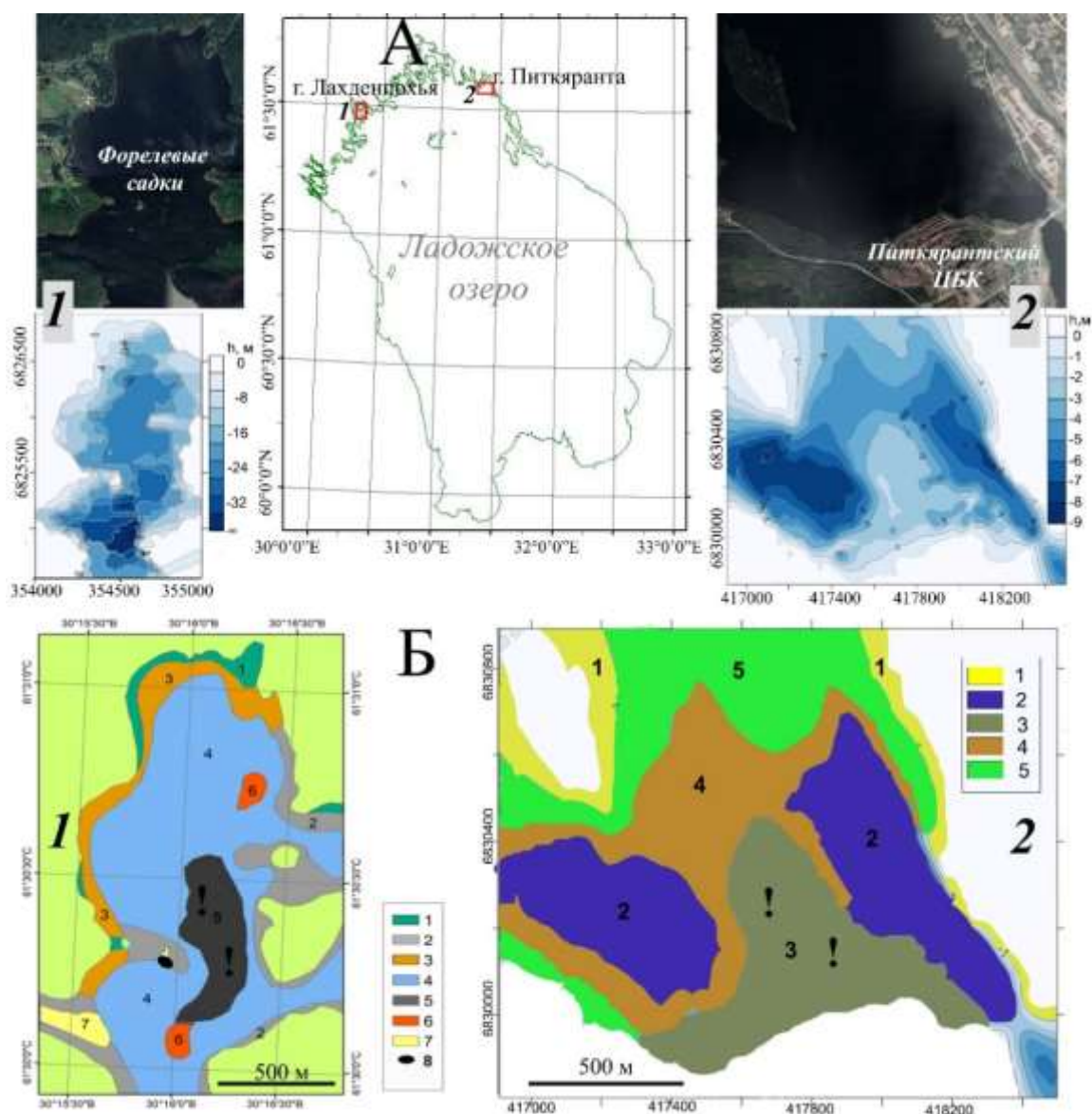


Рис. 1. Размещение и батиметрические карты-схемы тестовых полигонов (1 – в зоне влияния форелевого хозяйства в заливе Мусталахти; 2 – у Питкяринского ЦБК) в акватории Ладожского озера (А) и их ландшафтная структура (Б) с выделением участков трансформированного дна (выделены знаком «!»). Арабскими цифрами на ландшафтных схемах (Б) показаны номера выделенных ландшафтных фаций

Создание цифровой батиметрической модели по полученным цифровым данным с эхолота проводилось с использованием программ Surfer 9 и Arc Map 10.5. Создание координатно привязанных крупномасштабных ландшафтных схем проводилось в программе ArcMap 10.5. Основными критериями выделения фациальных границ были геоморфологический и седиментационный (в том числе отделялся тип дна, имеющий характерные визуальные отличия от окружающего фонового на участках, подверженных нагрузке отходами антропогенного предприятия или повышенным накоплением биогенов). Биологические компоненты (показатели численности и биомассы, таксономический состав зообентоса, площадь покрытия воздушно-водными и полупогруженными макрофитами) учитывались, однако рассматривались как вторичный критерий.

По результатам проведенных работ были составлены батиметрические и ландшафтные карты-схемы, приведенные на рис. 1.

Выделение в структуре ландшафтов фаций антропогенно измененного дна с применением картографического метода позволяет оценить площадное распространение явления. Для тестового участка в зоне размещения форелевого хозяйства было выявлено, что площадь, где явно выражены изменения типа дна (Фация 5 на рис. 1Б-1), занимает порядка 220 тыс. м² (приблизительно 15% площади бухты) и приурочена к наиболее глубоководным ее участкам. В районе ЦБК площадь, занятая отходами лигнин-шлама и прилегающего к нему дна с выраженным развитием бактериальных матов (Фация 3 на рис. 1Б-2), по предварительным подсчетам составляет порядка 250 тыс. м².

Внешний облик поверхности дна в зонах воздействия изменяется. Под садками рыбоводных предприятий увеличение концентрации органического вещества приводит к образованию характерных бактериальных пленок, форма и характер которых меняется в течение сезона и в разных частях относительно зоны максимального накопления и поступления органики (рис. 2-1). На участках, где твердые отходы предприятий деревообрабатывающей промышленности попадают на дно прилежащей акватории, вместо типичных грунтов наблюдаются плотные скопления шлам-лигнинина, с признаками процессов разложения целлюлозы, характерным резким запахом гниения (происходит выделение метана и углекислого газа в бескислородных условиях), а также отмечается формирование бактериальных матов на дне (рис. 2-2); на более удаленных участках выделяются нагромождения затопленных бревен и древесных остатков, количество которых снижается по мере удаления в открытую часть акватории. Эти характерные особенности облика дна в обоих случаях хорошо выделяются с помощью подводной видеосъемки и гидроакустической съемкой ГЛБО. Что позволяет выделять границы зон распространения трансформированного дна с высокой достоверностью.

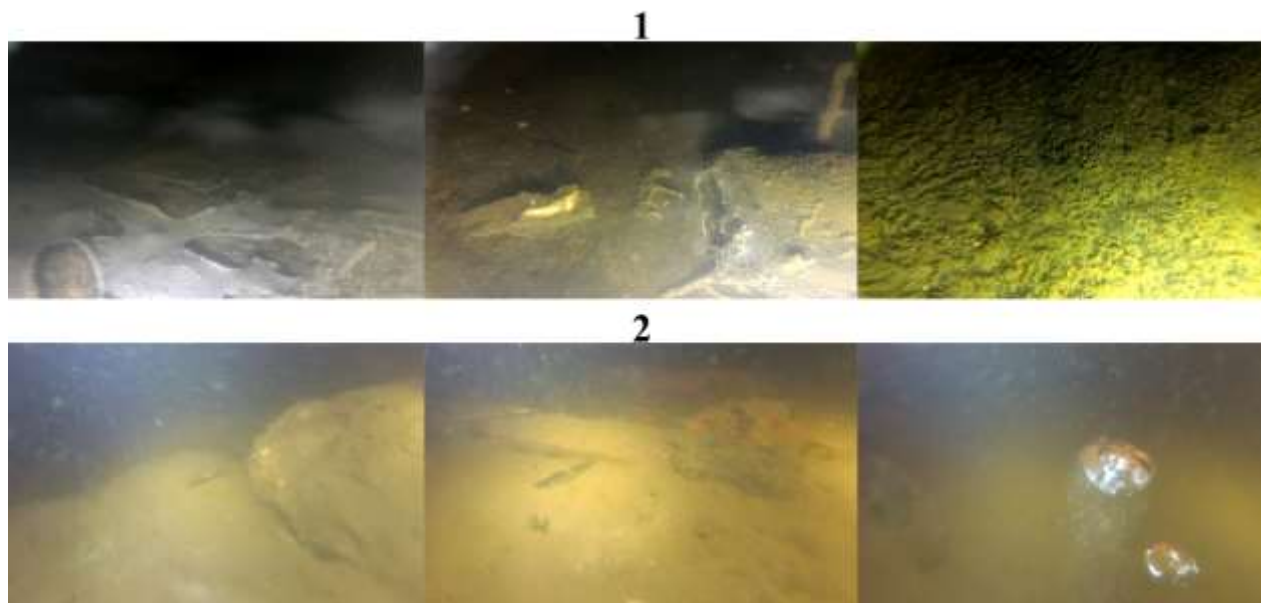


Рис. 2. Характерный облик дна на участках, подверженных антропогенному воздействию: под садками (1) и вблизи ЦБК (2)

Таким образом, проведенные исследования подтверждают важность картографирования для возможности вычисления площадей трансформированных участков дна. При комплексной оценке с проведением гидрохимических исследований и биологической индикацией этот подход является надежным инструментом для полноценной оценки степени воздействия отдельных предприятий на качество водной среды, состояние дна, гидробионтов и для принятия хозяйственных решений, позволяющих минимизировать воздействие.

Публикация составлена при поддержке Гостемы ИНОЗ РАН–СПб ФИЦ РАН № FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

Список литературы:

Дудакова Д.С., Анохин В.М. Использование ландшафтного подхода и современных дистанционных методов в мониторинге состояния крупных озер на примере Ладожского озера // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы III международной конференции (г. Казань, 20–23 мая 2025 г.). Казань: Издательство Академии наук РТ, 2025. С. 72–75.

Литоральная зона Ладожского озера / Курашов Е.А., Андронникова И.Н., Барбашова М.А. и др. / Под ред. Е.А. Курашова СПб.: Нестор-История 2011. 416 с.

Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Расулова А.М., Коробченкова К.Д. Ладожское озеро – геостратегический водный объект Северо-Запада России и его зоны экологического риска // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 139–161.

Dudakova D.S., Lapenkov A.E., Anokhin V.M., Guzeva A.V., Zaripova K.M. Changing the appearance of underwater landscapes in the coastal zone of Lake Ladoga under the influence of trout farming activities // Limnology and Freshwater Biology. 2024. No. 6. P. 1503–1524. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1503

Lapenkov A.E., Guzeva A.V., Zaripova K.M., Dudakova D.S., Trifonov A.V. Hydrobiological and geochemical responses to trout cage aquaculture in a lake ecosystem (Lake Ladoga, Russia) // Limnological Review. 2024. Vol. 24. P. 593–615. DOI: 10.3390/limnolrev24040035.

Zvereva Yu.M., Tomberg I.V., Annenkov V.V., Medvezhonkova O.V., Timoshkin O.A. Industrial site of out-of-operation Baikalsk Pulp and Paper Mill as a potential source of pollution in Lake Baikal coastal zone // Limnology and Freshwater Biology. 2022. Vol. 5. P. 1630–1638. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-5-1630

УДК 556.532

ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БУДЫКО–ФУ ДЛЯ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭЛАСТИЧНОСТИ СТОКА В СТВОРЕ Р. СОСНА – Г. ЕЛЕЦ

Дюкарев Д.Е.

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, *d-dukarev@yandex.ru*

Аннотация. На основе уравнения Будыко-Фу выполнена оценка климатической обусловленности изменений среднегодового стока в створе р. Сосна – г. Елец за 1950-2023 гг. Использованы данные по расходам воды, осадкам и температуре воздуха, дополненные реанализом ERA5-Land. Потенциальная эвапотранспирация рассчитана по методике FAO-56 Penman-Monteith. Для водосбора получен параметр Фу ($w=3.47$) и выявлено смещение к более аридным условиям (рост φ с 1.02 до 1.07), сопровождающееся снижением слоя стока (со 127 до 106 мм). Декомпозиция речного стока показала, что порядка 24% изменений связано с динамикой климата, а основная часть - с изменением интегральных свойств водосбора.

Ключевые слова: Будыко-Фу, водный баланс, эластичность стока, р. Сосна, Верхний Дон.

Река Сосна – крупный правый приток реки Дон, площадь водосбора которого равна 16300 км² и охватывает территорию Липецкой, Орловской, Курской и Воронежской областей (Ресурсы..., 1964; Дмитриева, Дюкарев, 2023). Важной особенностью формирования среднегодовых водных ресурсов на данном водосборе является статистически значимый нисходящий тренд (Дмитриева, Дюкарев, 2025), что не характерно для большинства сопоставимых водосборов в бассейне Верхнего Дона.

В последние годы в зарубежных исследованиях все шире используется концепция Будыко в модификации Фу для анализа многолетнего водного баланса водосборов и описывает, **какая доля поступающих осадков возвращается в атмосферу через фактическую эвапотранспирацию, а какая формирует речной сток** (Budyko, 1974; Fu, 1981). Для рек Европейской части России данная методика применялась ранее (Григорьев и др., 2024), включая бассейн Дона, однако бассейн р. Сосна в указанном исследовании рассмотрен не был.

Цель исследования — разделить вклад климатических факторов и вклад изменений подстилающей поверхности в наблюдаемое снижение стока в створе р. Сосна – г. Елец.

Материалы и методы. Используются гидрологические данные о среднегодовом расходе воды, полученные из серии справочников «Основные гидрологические характеристики», гидрологических ежегодников и сайта АИС ГМВО. Наблюдаемые расходы воды были переведены в слой стока (h) для сопоставимости с климатическими данными. Климатические данные об осадках и температуре воздуха рассмотрены по метеорологической станции г. Елец, дополненные материалами реанализа ERA5-Land (солнечная радиация, влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра).

Исследование охватывает период с 1950 по 2023 гг. Наличие монотонных трендов во временных рядах оценивалось *непараметрическим тестом Манна–Кендалла* при уровне значимости $\alpha=0.05$ (95%).

Методика исследования основывается на уравнении Будыко–Фу (1) (Budyko, 1974; Fu, 1981). В многолетнем масштабе поступившая на водосбор влага расходуется, главным образом, двумя путями: на испарение и на формирование стока. Их соотношение определяется климатическими условиями (обеспеченностью осадками и испарительным спросом атмосферы) и интегральными свойствами водосбора, связанными с подстилающей поверхностью и водоудержанием.

$$\frac{E}{P} = 1 + \varphi - (1 + \varphi^w)^{\frac{1}{w}} \quad (1)$$

где E – фактическая эвапотранспирация, мм; P – осадки, мм; $\varphi = \frac{PET}{P}$ – индекс аридности, PET – потенциальная эвапотранспирация, мм; w – параметр Фу, характеризующий интегральные свойства водосбора.

Фактическая эвапотранспирация оценивалась из уравнения многолетнего водного баланса (2) при допущении пренебрежимо малых многолетних изменений запасов влаги ($\Delta S \approx 0$).

$$E = P - h \quad (2)$$

где h – слой стока, мм.

Потенциальная эвапотранспирация принята равной эталонной и рассчитана по *FAO-56 Penman-Monteith* (Allen, 1998). По годовым значениям P , PET и h рассчитывались E/P и φ , по которым строилась кривая Будыко-Фу. Параметр w оценивался по годовым данным методом наименьших квадратов путем минимизации расхождений между наблюдаемыми значениями E/P и значениями, рассчитанными по (1). Далее выполнена декомпозиция изменения стока между периодами на климатическую и неклиматическую составляющие: климатический вклад определялся при фиксированном w , а остаток интерпретировался как изменение интегральных свойств водосбора (изменение w), связанное с подстилающей поверхностью и антропогенным воздействием (Fu, 1981).

Результаты и обсуждение. В бассейне реки Сосны в створе г. Елец за период с 1950 по 2023 гг. в среднем осадки (P) составляют 567 мм/год, потенциальная эвапотранспирация (PET) – 592 мм/год, слой стока (h) – 117 мм/год. Индекс аридности равен 1.04.

Тест Манна–Кендалла выявил статистически значимый положительный тренд PET и отрицательный тренд h (рис. 1), что указывает на увеличение испарительного спроса атмосферы на фоне снижения водоотдачи водосбора. Во временном ряду данных в годовой сумме осадков наблюдается положительная динамика, однако она не является статистически значимой.

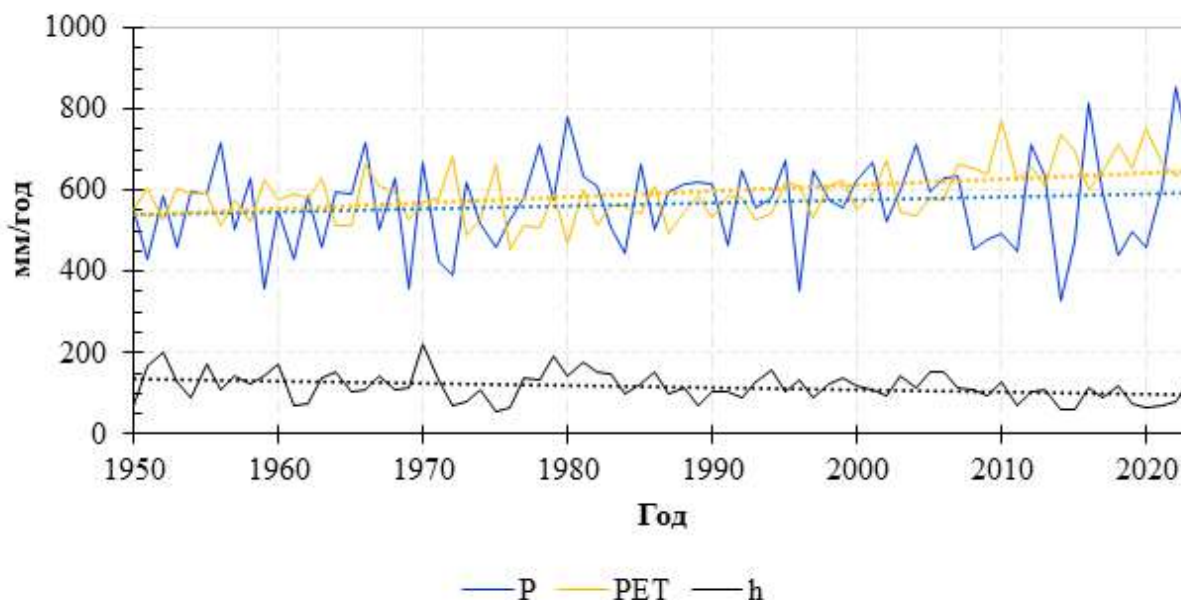


Рис. 1. Временные ряды годовых сумм осадков (P), потенциальной эвапотранспирации (PET) и слоя стока (h) на водосборе р. Сосна – г. Елец за 1950–2023 гг.

Для оценки изменений водного баланса ряд разделен на два полупериода: 1950–1987 и 1988–2023 гг. (граница 1987 г. соответствует началу устойчивого потепления; Дмитриева, 2025). Обобщенная характеристика водного баланса по двум временным интервалам и для всего периода представлена в табл. 1. Во втором полупериоде осадки увеличились на 26 мм, тогда как потенциальная эвапотранспирация увеличилась на 56 мм. В результате индекс аридности (ϕ) повысился с 1.02 до 1.07, а отношение E/P – с 0.77 до 0.82. На фоне этих процессов происходит снижение речного стока (с 127 до 106 мм).

Таблица 1. Средние значения элементов водного баланса р. Сосна – г. Елец.

Период	Осадки (P), мм	Потенциальная эвапотранспирация (PET), мм	Слой стока (h), мм	E/P	Индекс аридности (ϕ)
1950-1987	554	565	127	0.77	1.02
1988-2023	580	621	106	0.82	1.07
1950-2023	567	592	117	0.79	1.04

На рис. 2 представлена кривая Будыко-Фу, описывающая зависимость между энергетическим спросом атмосферы и водной доступностью на водосборе. Параметр w для всего периода наблюдений равен 3.47. Смещение точек в современный период соответствует росту ϕ и увеличению отношения E/P , то есть возрастанию доли осадков, возвращаемой в атмосферу через испарение, что согласуется со снижением наблюдаемого стока.

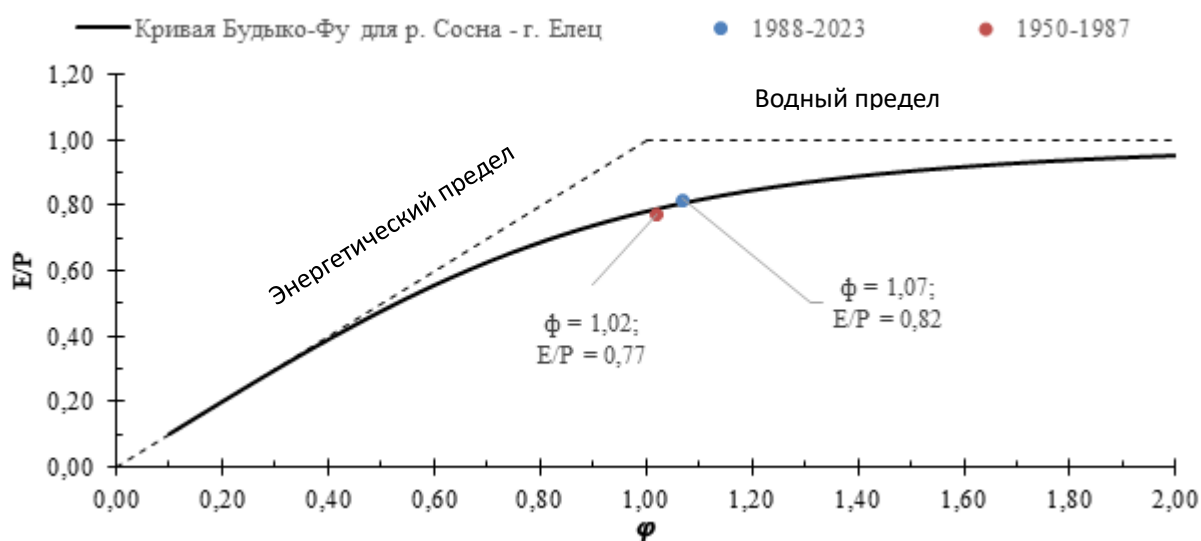


Рис. 2. Кривая Будыко-Фу для водосбора р. Сосна – г. Елец

Расчетами по модели Будыко-Фу оценена **эластичность речного стока** по отношению к годовым осадкам P , потенциальной эвапотранспирации PET и параметру w , характеризующему интегральные свойства водосбора (табл. 2). Полученные значения показывают **относительную чувствительность** стока: увеличение P на 1% приводит к росту стока примерно на 2,6%, тогда как увеличение PET на 1% сопровождается снижением стока примерно на 1,6%. Отрицательная эластичность по w (≈ -1) указывает, что рост w усиливает долю испарения в водном балансе и, следовательно, уменьшает сток при прочих равных.

Таблица 2. Эластичность факторов, влияющих на речной сток.

Водосбор	ε_P	ε_{PET}	ε_w
р. Сосна – г. Елец	2.6	-1.6	-1.2

Декомпозиция изменения стока между полупериодами показала, что из общего снижения h на 21 мм климатическая составляющая равняется 5 мм (24%). Данный эффект обусловлен прежде всего ростом потенциальной эвапотранспирации при относительной стабильности годовой суммы осадков, что ведет к увеличению доли испарения в водном балансе. Остальные 16 мм (76%) интерпретируются как неклиматический вклад, связанный с трансформацией подстилающей поверхности или антропогенной нагрузкой. Тем самым в рассматриваемый период доминируют неклиматические факторы изменения стока.

Результат исследования согласуется с региональными оценками для южной части Европейской территории России (Григорьев и др., 2024): для водосборов бассейна Дона наблюдается тенденция в повышении индекса аридности (φ) и увеличении параметра Фу (w). При этом отмечается, что изменениями годовых сумм осадков и потенциального испарения не полностью объясняется снижение речного стока в бассейне Дона, как и в исследуемом водосборе в данной работе.

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**:

1. Сравнение средних значений элементов водного баланса для водосбора р. Сосна – г. Елец позволяет установить, что в период 1988-2023 гг. наблюдается снижение среднегодового речного стока на 21 мм при росте потенциальной эвапотранспирации и слабых изменениях годовой суммы осадков.
2. Климатические условия стали более засушливыми: индекс аридности (φ) увеличился с 1.02 до 1.07.
3. Декомпозиция речного стока показала, что порядка 24% изменений связано с изменениями климата, а основная часть - с изменением интегральных свойств водосбора. Таким образом, в рассматриваемый период доминируют неклиматические факторы изменения стока, что требует дополнительных исследований.

Список литературы:

Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Сазонов А.А., Пахомова О.М., Поздняков С.П., Ван Пин. Связь между осадками, речным стоком и испаряемостью на Европейской части России и ее изменчивость // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2024. Т. 79. № 6. С. 55–66. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.5.

Дмитриева В.А., Дюкарев Д.Е. Определение водосборной площади реки Сосна на основе ЦМР и ГИС-технологий // Региональные эколого-географические и туристско-рекреационные исследования. Сб. научных статей. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2023. С. 360–364.

Дмитриева В.А., Дюкарев Д.Е. Годовой речной сток в бассейне реки Сосна: статистическая обработка и прогноз // Региональные эколого-географические и туристско-рекреационные исследования. Сб. научных статей. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2025. С. 335–340.

Ресурсы поверхностных вод. Гидрологическая изученность. Донской район. Т. 7. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 267 с.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. 300 p.

Budyko M.I. Climate and Life. New York: Academic Press, 1974. 508 p.

Fu B. P.: On the calculation of the evaporation from land surface (in Chinese), Scientia Atmospherica Sinica, 5, 1981. pp. 23–31.

УДК 556

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕК ГОРНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ
СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ С НАЛЕДНЫМ ПИТАНИЕМ НА ПРИМЕРЕ
РЕКИ АНМАНГЫНДА**

Землянскова А.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В.

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия,
anastasiazemlanskova@gmail.com

Аннотация. Гидрологическая роль наледей в формировании речного стока может быть сопоставима с ледниками. Однако существует недостаток современных данных о динамике их развития и доли в водном балансе. На примере наледи, формирующейся в бассейне р. Анмангынды, проведена оценка вклада наледного стока в сток реки. На основе математической модели «Гидрограф» проведены численные расчеты формирования стока, которые позволили установить, что наблюдается уменьшение влияния наледи на сток. Это связано с тем, что максимальные морфометрические характеристики наледи сократились.

Ключевые слова: наледь, модель «Гидрограф», математическое моделирование, р. Анмангынды, водный баланс, криолитозона

Наледи являются ключевым элементом в цепи водообменных процессов зоны распространения многолетнемерзлых пород. Согласно наблюдениям Б. Л. Соколова, в мае-июне до 50–90% наледного стока попадает в речной сток, в июле эта доля снижается до 30%, а в августе - до 7% (Соколов, 1975). На территории Северо-Востока России ежегодно формируется около 7000 наледей размерами от 0.01 км² до практически 80 км², а их суммарный объем оценивается в 10.6 км³ (Атлас, 2021).

В связи с необходимостью изучения наледного стока на территории Северо-Востока в 1962 г. Колымским управлением гидрометеослужбы были организованы стационарные наблюдения наледного режима в бассейне р. Анмангынды (Магаданская область). Для этого была создана специальная гидрографическая партия, которая просуществовала до 1977 г. В дальнейшем наблюдения производились с небольшими перерывами силами сотрудников гидрометеостанции Усть-Омчуг (до 1992 года). Наледь расположена в среднем течении р. Анмангынды (приток р. Детрин, р. Колыма), в 30-км юго-восточнее пос. Усть-Омчуг.

Цель настоящего исследования – выполнить оценку вклада наледного стока в сток р. Анмангынды, а также установить факторы, которые оказывают влияние на формирование наледи.

В 1962–1987 гг. на р. Анмангынды ниже образования наледи велись наблюдения за стоком реки (Государственный ..., 1985). Эти данные использовались для оценки вклада наледного стока, а также для верификации модели «Гидрограф».

Математическая модель «Гидрограф» с распределенными параметрами комбинирует в себе как физически обоснованные, так и концептуальные методы, что позволяет достичь баланса между сложностью расчетов и доступностью параметризации модели (Виноградов, 1988). Она применялась для расчета стока рек бассейна р. Колымы, где распространены многолетнемерзлые породы (Нестерова, 2022), и результаты были приняты удовлетворительными.

В качестве входной информации использовались данные метеорологической станции Усть-Омчуг (1967–2025), к которым относятся температура и дефицит влажности воздуха, осадки. Также была проведена оценка изменения средней годовой температуры воздуха, годового количества осадков и их значений в осенне-зимний период.

Объем наледи в современный период определялся с помощью расчетной формулы

$$W=0.364*S^{1.167}$$

где W — объем льда (тыс. м^3), S — площадь льда, тыс. м^2 , коэффициенты a и n были предложены в работе (Землянскова и др., 2021). Для исторического периода (1963–1990) формула показала удовлетворительные результаты. Отклонение расчетных от наблюдаемых величин составило 0.01–2.09 млн м^3 или 0–5 мм стока. Площадь наледи определялась по данным спутникового мониторинга Landsat (датчики TM, ETM+ и OLI) и Sentinel-2 (датчик MSI) за период 1999–2022 гг. и 2016–2025 гг., соответственно.

На основе сведений об объеме наледи на период максимального развития, а также периоде ее формирования, который вычисляется, как количество дней между датами перехода средней суточной температуры воздуха через нуль градусов, была проведена оценка расхода источника, питающего наледь.

С 2020 г. в бассейне р. Анмангында ведутся междисциплинарные исследования, направленные на изучение формирования стока реки и мерзлотно-гидрологических условий. Ежегодно проводятся работы по оборудованию гидрологических постов выше и ниже формирования наледи, а также на крупном притоке руч. Ольчан. В зимний период участок реки выше наледи не промерзает, что позволяет проводить наблюдения за стоком круглый год.

Средний объем наледи за период 1963–1991 гг. был 8.5 млн м^3 , что составляет 22.6 мм годового слоя стока, а максимальный – 11.7 млн м^3 (1967 г.). Современные оценки показывают значительное уменьшение общих размеров Анмангындинской наледи, так в 2000–2025 гг. максимальный объем по расчетным оценкам не превышал 9.0 млн м^3 , а в среднем составляет 7 млн м^3 , что на 17.6% меньше, чем в исторический период. Площадь наледи по материалам спутникового мониторинга (2000–2025 гг.) оценивается в среднем в 4.6 км^2 , изменяясь от 3.1 до 5.8 км^2 в разные годы. По историческим материалам максимальная площадь наледи наблюдалась в 1978 г. и составила 6.8 км^2 (при среднем значении за период наблюдений 5.2 км^2).

Наибольший дебит источников, формирующих наледь, приходится на осенне-зимний период, поэтому можно предполагать, что колебания метеорологических факторов именно в это время оказывают существенное влияние на интенсивность нарастания объема наледи. В работе (Алексеев и др., 2012) было указано, что чем сильнее будет выхолаживание наледной поляны осенью и ранней зимой, тем интенсивнее будет нарастание льда и меньше воды уйдет транзитом за ее пределы. В то же время, чем больше будет сумма осадков в октябре и ноябре, тем большее количество воды уйдет за пределы наледной поляны, и, соответственно, меньшим будет объем тела наледи в период его максимального развития.

По данным метеорологической станции Усть-Омчуг температура воздуха и количество осадков в этом районе повысились, причем наиболее сильные изменения наблюдаются в начале зимы (октябрь–декабрь). В последние десятилетия снежный покров образуется раньше, а его мощность становится больше. Установлена умеренная отрицательная корреляция между суммой твердых осадков за период ноябрь–декабрь 2000–2025 гг. и характеристиками наледи. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил -0.54 при уровне значимости $p < 0.05$.

Результаты оценки расхода источника, питающего наледь показали, что за период 1968–2025 гг. он изменялся от 0.22 до 0.57 $\text{м}^3/\text{с}$, а в среднем составил 0.38 $\text{м}^3/\text{с}$. По данным полевых наблюдений 1962–1963 гг., 1965–1966 гг. средний расход р. Анмангында выше формирования наледи в период декабрь–апрель составлял 0.55 $\text{м}^3/\text{с}$, изменяясь от 0.20 до 0.80 $\text{м}^3/\text{с}$. Исследования 2020–2025 гг. показали значения 0.19–0.86 $\text{м}^3/\text{с}$ (среднее 0.35 $\text{м}^3/\text{с}$). Следует отметить, что это результаты измерений, проводившихся один или два раза в месяц, но в целом можно предположить, что расход источника в зимний период за нескольких десятилетий не изменился. Расчетные значения расхода источника согласуются с данным наблюдений.

Непрерывное моделирование стока реки Анмангында проведено за период наблюдений за гидрологическим режимом (1967–1987), который использовался для оценки применимости модели «Гидрограф», а также за 2000–2025 гг., чтобы проследить возможные изменения стока в регионе. Разница между годовыми рассчитанными и наблюдаемыми слоями стока в среднем составила 36 мм или 13%. Медианные значения критерия NS в среднем – 0.57. Доля наледного стока в период половодья изменялась от 5 до 36%, а за год – от 4 до 12% (от 15.4 до 31.1 мм).

В 1981 г. доля наледного стока в годовом стоке реки была 22.7 мм (12.3%), а в период весеннего половодья (май–июнь) – 19.2 мм или 33%. На рис. 1 показана роль наледи в формировании стока реки Анмангында. В маловодные годы в период половодья и летней межени практически весь сток – это результат разрушения наледи.

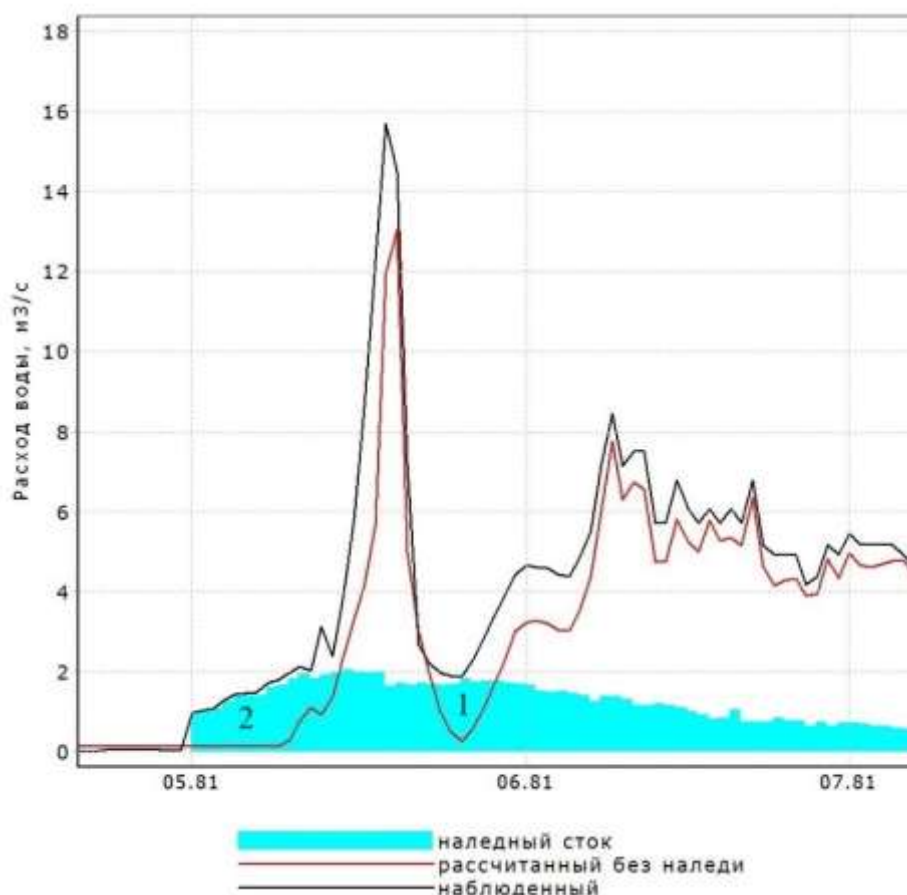


Рис. 1. Рассчитанный общий и наледный сток р. Анмангында в период половодья, 1981 г.
Области 1 и 2 – доля наледного стока почти 100%

Результаты моделирования за современный период показали, что отмечается значительное изменение величин водного баланса бассейна р. Анмангында в 2000–2022 гг. по сравнению с периодом 1967–1987 гг. Это может быть связано с наблюдающейся трансформацией гидрологического режима рек Северо-Востока страны под влиянием потепления климата (Makarieva et al., 2019). Отмечается, что в современный период годовая величина стока реки Анмангында увеличилась в среднем с 294 мм (1967–1987) до 353 мм (2000–2025), а максимальные и минимальные значения достигли 600 и 251 мм, ранее они были на уровне – 459 и 163 мм, соответственно.

Отмечается и уменьшение роли наледного стока в формировании водного баланса реки Анмангында. В 2000–2022 гг. его величина изменялась от 11.5 до 22.6 мм, что составило от 4 до 9% годового стока реки, а в период весеннего половодья питание за счет наледных вод не превышало 23%.

Анализ расчета расхода воды источника, которым питается наледь, а также полевых наблюдений показал, что за период 1968–2025 гг. он остается в пределах 0.20–0.90 м³/с. Установленное изменение климатических характеристик в осеннее – зимний период определяет интенсивность нарастания наледного тела и приводит к деградации наледи, и, как следствие, к уменьшению роли наледи в питании реки Анмангында.

Список литературы:

- Алексеев В.Р., Бояринцев Е.Л., Довбыш В.Н. Многолетняя динамика размеров Амангындинской наледи в условиях изменений климата // Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока. Тр. Всерос. науч. конф., посвящ. памяти выдающегося ученого-гидролога А. В. Рождественского. 10–12 апреля 2012 г. М.: Ин-т водных проблем РАН, 2012. С. 298–305.
- Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., Землянскова А.А. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / ред. В. В. Шепелев, М. Н. Железняк. Новосибирск: СО РАН, 2021. 302 с.
- Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока: опыт критического анализа). Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
- Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. Вып. 17. Бассейны рек Колымы и рек Магаданской области. 1976–1980 гг. // Колымское управление гидрометеорологической службы. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
- Землянскова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Многолетняя динамика гигантской Амангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962-2021 гг.) // Лёд и снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 71–84.
- Нестерова Н.В. Моделирование гидрологических характеристик бассейнов горных рек России различной степени изученности в современном климате. Дис. ... канд. техн. наук: 1.6.16. Санкт-Петербург, 2022. 177 с.
- Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 190 с.
- Makarieva O.M., Nesterova N.V., Post D.A., Sherstyukov A., Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // Cryosphere. 2019. Vol. 13. P. 1635–1659.

УДК 556.1(282.257.583.1)

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОЗЕРА ХАНКА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Катайкина О.И., Матвеев В.И.

Всероссийский институт рыбного хозяйства и океанографии тихоокеанский филиал ФГБНУ
«ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Россия, *SHOI85@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматриваются особенности изменений гидрохимических характеристик в озере Ханка в зимний период за 2016-2025 гг. Отмечено, что подо льдом происходит активное развитие фитопланктона, вследствие чего относительное содержание растворенного кислорода составляет более 100 %. Высокие значения БПК₅ свидетельствуют о разложении большого количества органического вещества и окисления органики. Наблюдается рост фосфатов, нитратов и нитритов, что вероятно связано с интенсивным использованием озера в последние годы.

Ключевые слова: озеро Ханка, температура, кислород, биогены, лед.

Озеро Ханка входит в десятку самых больших озер России, занимая пятое место, уступая лишь таким озерам как Байкал, Ладожское, Онежское и Таймыр. Площадь его непостоянна и изменяется в зависимости от климатических факторов от 5010 км² до 3940 км², в среднем составляя 4090 км² (Васьковский, 1978).

Усиленное внимание ученых к озеру Ханка в последнее время связано как с увеличением уровня озера, который 2016 г. достиг максимального значения за весь период наблюдений, так и вследствие усиленного использования озера в рекреационном и рыбопромысловом направлении. В работах, посвященных гидрологическим и гидрохимическим условиям озера, рассмотрены в основном теплый период года с мая по октябрь (Апонасенко и др., 1997; Матвеев и др., 2000; Семькина, 2006).

Между тем, зимний период – это одна из наиболее сложных фаз в жизни озер. Это время характеризуется наименьшим запасом воды на озере, ухудшением газообмена между атмосферой и водной толщей, а также снижением теплозапаса и уменьшением содержания растворенного кислорода, необходимого для нормальной зимовки гидробионтов. Это обстоятельство и определило цель работы.

Целью настоящей работы является анализ натурных наблюдений, выполненных Тихоокеанским филиалом ФБНУ ВНИРО на озере Ханка в феврале с 2016 по 2025 гг. с целью выявить основные экологические характеристики озера зимой.

Материал и методика

Начиная с 2016 года в феврале Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» проводит наблюдения за гидрологическим и гидрохимическим режимом. Сбор гидрологической информации осуществлялся с помощью гидрологического зонда Rinko ASTD102-ALC-R02 в автономном режиме. В воде определялось содержание растворенного кислорода, взвешенных веществ, рН и биогенных элементов (фосфаты, силикаты, нитраты, нитриты, аммоний) согласно Руководству..., 2003. Пробы воды отбирали подо льдом. Дополнительно содержание растворенного кислорода определялось при помощи оптического датчика фирмы Rinko, показания которого сравнивались с определением растворенного кислорода методом Винклера.

Результаты

Ледовый режим. Ханка замерзает во второй половине ноября, вскрывается в апреле. Мощность ледяного покрова зависит от суровости зимы. В целом, чем выше температура воздуха в зимние месяцы, тем меньше толщина ледяного покрова. Коэффициент детерминации зависимости мощности ледяного покрова от температуры воздуха составляет $R^2 = 0,90$. Наименьшая средняя толщина льда в феврале за рассматриваемый период наблюдалась в 2019 г. (60 см), а наибольшая в 2018 (100 см).

Температурный режим. Осенью в виду мелководности озера и вследствие вертикального перемешивания температура воды во всем слое практически одинакова. Так, в октябре температура воды изменяется от 10.41 на поверхности до 10.38°C у дна. С этого момента начинается интенсивное охлаждение водной массы, которая вначале ледостава обладает минимальным теплозапасом. В декабре температура воды с глубиной изменяется от 0,9 подо льдом до 1.6°C у дна. После ледостава интенсивное охлаждение водной массы прекращается, водная масса озера характеризуется максимальным теплозапасом.

Сразу после образования льда на поверхности озера теплообмен с атмосферой меняется кардинальным образом. Сквозь лед он возможен только посредством молекулярной диффузии тепла из воды в атмосферу. В этих условиях в тепловом балансе озера ведущую роль начинает играть поступление тепла из донных отложений. Водная масса озера начинает достаточно быстро прогреваться, и в феврале температура воды у дна на разрезе составляет 3.5–4.5°C.

Озеро Ханка, вследствие своей мелководности, относится к эпитепмическим озерам, вода в которых в течение всего безледового периода находится в состоянии гомотермии или слабовыраженной прямой стратификации. Летом донные отложения аккумулируют большое количество тепла, за счет которого обеспечивается зимний прогрев придонных слоев воды. Поток тепла на границе «вода–донные отложения» играет решающую роль в изменении термической структуры мелководных озер в период ледостава. При наличии сплошного льда на поверхности озера, препятствующего потерям тепла в атмосферу, теплообмен с донными отложениями обуславливает повышение температуры водной толщи озер. Зимой поток тепла направлен из донных отложений в воду (Здоровеннова, 2020).

Распределение температуры воды на разрезе в феврале относительно равномерное. Температура воды подо льдом изменялась от +0.2 до +1.5°C, а на глубине 3–3.5 м от 4.0 до 4.4°C. Таким образом повышение температуры у дна обусловлена прогревом придонных вод за счет отдачи тепла, накопленного грунтом за теплые месяцы. При этом максимальная плотность пресной воды отмечается при температуре 4.0°C, что препятствует вертикальному обмену (рис. 1).

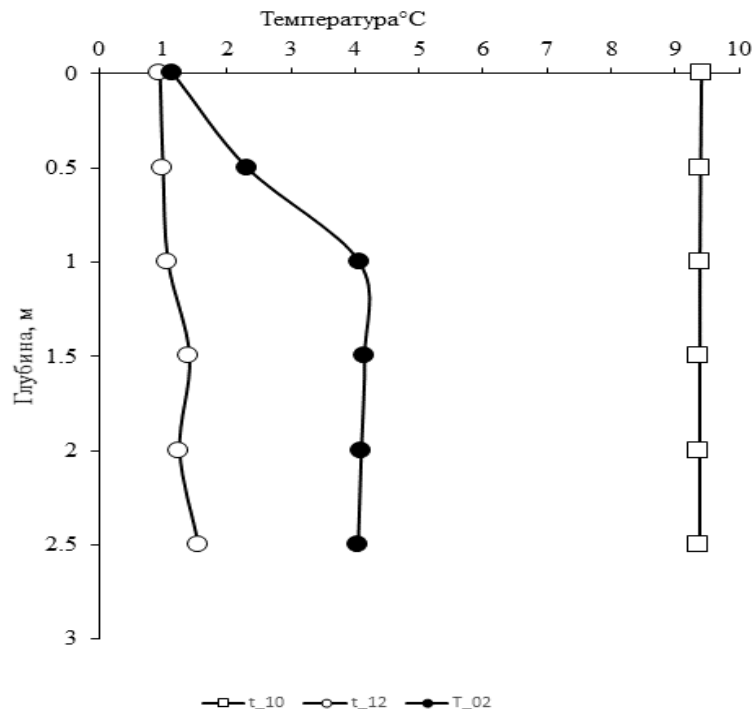


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры воды на станции №4 в октябре (t_10) в декабре 2017 г. (t_12) и в феврале 2018 г. (T_02). (Катайкина и др., 2023)

Растворенный кислород. За весь период наших исследований относительное содержание растворенного кислорода в феврале непосредственно подо льдом не опускалось ниже 120%, а во всем слое было выше 100%. Только в 2020 г. относительное содержание растворенного кислорода на разрезе в толще вод от поверхности до дна было близко к 100%. Биохимическое потребление кислорода (БПК₅) в рассматриваемые годы подо льдом было достаточно высоким и изменялось от 4,6 до 5,8 мл/л. Такая ситуация могла быть обусловлена, с одной стороны, разложением достаточно большого количества органического вещества, образованного при фотосинтезе и находящегося в исследуемом районе, а с другой – окислением органики, поступающей в воду с бытовыми отходами.

Озеро полностью покрыто льдом, который препятствует поступлению кислорода из атмосферы, поэтому вероятной причиной его высокого относительного содержания в воде могло быть обусловлено только фотосинтезом.

Подобные продукционные процессы в зимние месяцы наблюдаются и в многочисленных забайкальских озерах, где фитопланктон подо льдом активно развивается и образует зимние максимумы особенно в малоснежные зимы. (Ривьер, 2016).

Биогенные вещества и взвесь. Исследования, проведенные в 1991–1993 гг. показали, что по величине химического потребления кислорода класс воды изменяется от «предельно чистых» до «грязных» (Апонасенко и др., 1997).

С 2015 г. на берегах озера Ханка впервые в практике России начали раздаваться бесплатные гектары, которые используются для строительства и расширения баз отдыха, развития сельского хозяйства и животноводства. Это обстоятельство во многом может повлиять на трофность озера. Как отмечалось на II Всероссийской конференции с международным участием «*Трансграничное озеро Ханка: современное состояние и перспективы развития*» неочищенные сточные воды промышленных и сельскохозяйственных предприятий являются ведущим антропогенным фактором, влияющим на экологическую обстановку в бассейне оз. Ханка.

Так, в последние годы отмечается рост фосфатов и нитратов. Уровень концентрации фосфатов в феврале с 2016 по 2023 увеличился почти в 3 раза, а уровень концентрации нитратов в 5 раз (Катайкина и др., 2023). В 2024 году наблюдалось значительное уменьшение концентрации фосфатов и нитратов, но при этом довольно значительно выросло содержание кислорода. Такая ситуация могла быть обусловлена продукционными процессами. Вероятно, значительная часть фосфатов и нитратов была утилизирована фитопланктоном. Косвенно этот факт подтверждается увеличением относительного содержания растворенного кислорода в 2024 г. по сравнению с 2023 г. В феврале 2025 г. отмечался рост нитратов. Но при этом продолжалось уменьшение концентрации фосфатов. Причина такого поведения этих элементов пока не понятна. Возможно, это связано с развитием водорослей, которым фосфор необходим в большей степени.

Минерализация азота. В среднем коэффициент нитрификации для поверхностных вод озера Ханка зимой составил 0.23 при размахе значений от 0.1 до 0.5. Наиболее тесно минерализация зависит от температуры воды. Коэффициент корреляции минерализации азота от температуры составил 77%. От величины рН минерализация азота зависит в меньшей степени, коэффициент корреляции составил всего 33% (рис. 2).

В межгодовых изменениях концентраций взвешенных веществ и железа отмечались значительные колебания, но при этом, довольно хорошо прослеживается тренд на их повышение, что вероятно, указывает на рост загрязнения после раздачи бесплатных гектаров.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- Повышение температуры у дна обусловлена прогревом придонных вод за счет отдачи тепла, накопленного грунтом за теплые месяцы.

- Высокие концентрации растворенного кислорода и высокие значения БПК₅ в зимний период свидетельствуют о том, что подо льдом происходит активное цветение фитопланктона.

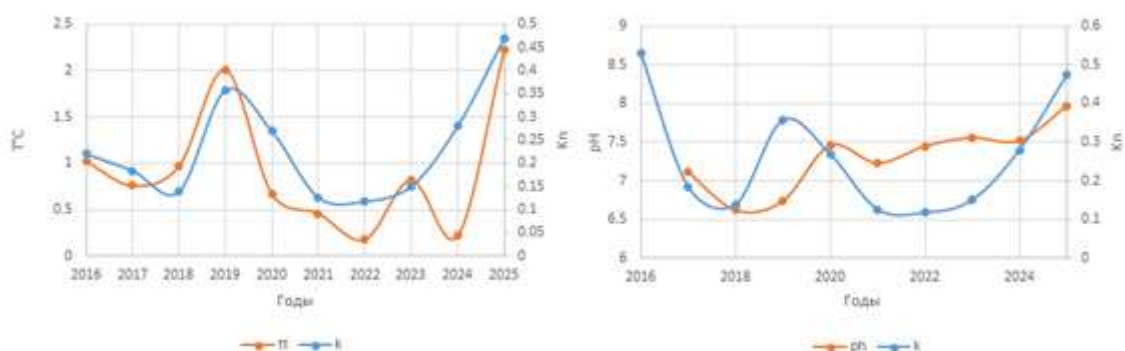


Рис. 2. Межгодовые изменения средних значений на разрезе коэффициента минерализации азота и температуры и pH в феврале

- Падение уровня озера и интенсивное его использование в рекреационном направлении после раздачи бесплатных гектаров, приводит к росту содержания биогенных веществ, в частности неорганических форм фосфора и азота.
- Высокие значения биохимического потребления кислорода (БПК₅) под льдом свидетельствуют о разложении достаточно большого количества органического вещества, образованного при фотосинтезе и находящегося в исследуемом районе, а с другой – об окислении органики, поступающей в воду с бытовыми отходами.
- Минерализация азота зимой зависит в основном от температуры воды и в меньшей степени от pH, чем ниже температура и pH, тем медленнее происходит минерализация.

Список литературы:

- Апонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Щур Л.А., Филимонов В.С. Оценка экологической ситуации и качества воды дальневосточного озера Ханка оптическими методами // Гидробиологический журнал. 1997. Т. 33. № 5. С. 54–63.
- Васьковский М.Г. Гидрологический режим оз. Ханка. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 176 с.
- Здоровеннова Г.Э., Гавриленко Г.Г., Пальшин Н.И. и др. Изменение теплопотока на границе вода-донные отложения в малом озере в течение года // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6 (16). Вып. 4. С. 116–128. DOI: 10.37279/2309-7663-2020-6-4-116-128.
- Катайкина О.И., Матвеев В.И., Фигуркин А.Л. Гидрологическая и гидрохимическая характеристика юго-западной части озера Ханка в зимний период 2016-2023 гг // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 699–710. DOI: 10.33933/2713-3001-2023-73-699-710
- Матвеев В. И., Курносова А. С., Катайкина О. И. Результаты гидрохимического мониторинга озера Ханка в 2016–2018 годах // Тихоокеанская география. 2020. № 3. С. 47–55. DOI: 10.35735/tig.2020.91.80.005
- Ривьер И.К. Особенности планктоценозов озер в разные экологические периоды (подледный и открытой воды) // Труды ИБВВ РАН. 2016. Вып. 74(77). С. 59–76
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана // М.: ВНИРО, 2003. 201 С.
- Семыкина Г.И. Обзор состояния и загрязнения озера Ханка по материалам государственной сети наблюдений за загрязнением окружающей среды / Труды 2-ой Международной конференции проблемы сохранения водно-болотных угодий международного значения: озеро Ханка. Спасск-Дальний, 2006. С. 190–201.

УДК 556.512:630*116.1

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЛЕСНОГО ПОКРОВА РОССИИ НА ИСПАРЕНИЕ И РЕЧНОЙ СТОК ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Кашутина Е.А., Коронкевич Н.И., Одеркова А.П., Гапич Е.С.

Институт географии РАН, Москва, Россия, e-mail: kashutina@igras.ru

Аннотация. Оценено влияние многолетних изменений лесистости и возрастной структуры лесов на испарение и речной сток на территории России. За последние 50 лет лесистость выросла с 42 до 46.4%, а возраст лесов изменился разнонаправленно. За счет лесного фактора сток в лесной зоне Европейской части России должен был снизиться на 4–6%, а в большинстве регионов Сибири вырасти на 2–4%. В регионах в бассейне Волги испарение, связанное с динамикой лесного покрова, могло увеличиться на 2%, а сток уменьшиться на 4%.

Ключевые слова: речной сток, испарение, лесной покров, возраст лесов, лесистость, водные ресурсы

За последние десятилетия произошли значительные изменения в составляющих водного баланса территории России. Значительно – до 20 и более процентов изменился речной сток, причем как в сторону увеличения, так и уменьшения в зависимости от региона (Многолетние..., 2021; Фролова и др., 2022).

Лесные биогеоценозы являются важнейшими стокоформирующими комплексами, однако их гидрологическая роль при современных климатических и антропогенных изменениях изучена недостаточно. Цель работы — оценка вклада изменений структуры лесного покрова (лесистости и возрастного состава) в многолетнюю динамику испарения и речного стока на территории России.

Методологической основой работы послужил подход О. И. Крестовского (1986), согласно которому возраст леса определяет соотношение испарения и речного стока: сразу после вырубок сток увеличивается до 165% от зонального показателя на фоне резкого сокращения испарения. К 25 годам после начала лесовосстановления испарение увеличивается, а сток сокращается до зонального. Далее к 50 годам сток уменьшается до 55%, а испарение увеличивается до 120%, после чего знак изменений меняется, и к 100 годам показатели опять становятся близки к зональным характеристикам. Спелые и перестойные древостои (>100 лет) способствуют очень медленному росту стока и сокращению испарения. Использованы данные Рослесхоза о среднем возрасте лесов по субъектам РФ, материалы ЕМИСС о лесистости³⁴, а также сведения о речном стоке на начало 1970-х гг. (Водные..., 1967).

За период с начала 1970-х по начало 2020-х гг. лесистость России увеличилась в среднем с 42 до 46.4%. Наибольший прирост (5–10%) отмечен в центральной и северной частях лесной зоны Европейской части России (ЕЧР). Небольшое сокращение (до 2%) затронуло южные регионы ЕЧР, Хакасию и Красноярский край. Средний возраст лесов вырос в большинстве центральных и южных регионов ЕЧР, Тюменской области, Красноярском крае, Тыве, Иркутской и Забайкальском краях, но сократился в Карелии, Пермском крае, Свердловской, Архангельской областях, Ненецком АО, Бурятии, Якутии и на Дальнем Востоке.

Расчеты показали, что изменения параметров лесного покрова привели к увеличению испарения на большей части ЕЧР (кроме севера, северо-востока и крайнего юга) а также на юге Западной Сибири на 2–4% (10–20 мм). В большинстве регионов Сибири испарение, связанное с лесным фактором, уменьшилось на 1–3% (5–15 мм). Годовой речной сток, обусловленный изменениями лесов, на большей части ЕЧР и юге Западной Сибири сократился на 3–9% (5–20 мм), а в большинстве сибирских регионов – увеличился на 2–4% (4–10 мм). В

³⁴ ЕМИСС. Государственная статистика. <https://fedstat.ru/indicator/38193>. (дата обращения 22.05.2026)

целом за последние 50 лет произошедшие изменения структуры лесного покрова регионов РФ должны были привести к снижению речного стока в лесной зоне ЕЧР на 4–6% и к росту стока в большинстве регионов Сибири на 2–4%. В регионах в бассейне Волги испарение могло увеличиться на 2%, а сток уменьшиться на 4%.

Прогнозные оценки до середины XXI века в зависимости от сценариев лесопользования, выполненные на основании методики О. И. Крестовского, показывают, что возможные изменения водного баланса только за счет трансформации лесного покрова в лесной зоне ЕЧР могут достигать 10% по испарению и 15% по стоку. Таким образом, фиксируемые изменения стока в бассейнах рек являются реакцией не только на климат, но и в значительной мере — на изменение структуры лесов. Учет лесного фактора позволяет корректировать оценки вклада климатических изменений, что необходимо для верификации климатических моделей и водохозяйственного планирования.

Работа выполнена по теме государственного задания FMWS-2026-0003.

Список литературы:

Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 198 с.

Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 119 с.

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

Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269.

УДК 597.2/.5

**ВЛИЯНИЕ ОЗЕРНОВСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА (ОГМК)
НА ИХТИОФАУНУ ВЕРХОВЬЕВ РЕК ОЗЕРНАЯ ВОСТОЧНАЯ И УКА
КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

Коростелев С.Г.¹, Болдырев В.С.^{1,2}, Яковлев С.В.^{1,2}

¹ Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, korostelevs@mail.ru

² Волгоградский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Волгоград, Россия

Реки Озерная Восточная и Ука – крупнейшие, сравнительно нетронутые, лососевые речные системы северо-восточной Камчатки, с хорошо сохранившимся нерестово-выростным фондом. В целом, в бассейне рек Озерная Восточная и Ука обитает 21 вид пресноводных, анадромных и прибрежных рыб и рыбообразных, относящихся к 2 классам, 7 отрядам, 10 семействам и 14 родам. В ихтиофауне явно преобладают представители отряда лососеобразных Salmoniformes: 4 семейства, 7 родов и 13 видов (Шейко, Федоров, 2000; Коростелев, 2025; Токранов 2025).

Реки Озерная Восточная и Ука составляют около 4% нерестового фонда тихоокеанских лососей *Oncorhynchus* Карагинской подзоны и обеспечивают до 10% уловов этих рыб всей подзоны. Удельная продуктивность бассейнов достигает 1.4–2.35 т/км². Удельная рыбопродуктивность нерестилищ достигает 3.64–9.57 кг/м² (одни из самых высоких показателей не только среди рек восточного побережья Камчатки, но и Камчатки в целом). Общая площадь нерестилищ тихоокеанских лососей в р. Озерная Восточная – 125 га, р. Ука – 290 га. Общая численность пропущенных на нерест тихоокеанских лососей в р. Озерная Восточная достигает 4.3 млн шт. (2007 г.), в р. Ука – 2.84 млн рыб (2009 г.). В нечетные годы обе реки обеспечивают 4.5–9.5 тыс. т, в среднем 6.5 тыс. т (в последние 7-8 лет вылов в обеих реках увеличился в 1.5–2 раза) вылова тихоокеанских лососей. Промысловая рыбопродуктивность обеих рек достигает 15.5 тыс. т, а их общая рыбопродуктивность – 21.5 тыс. т. (Введенская, Улатов, 2015).

Как было установлено ранее (Коростелев, Улатов, 2024), основные нерестилища нерки, кеты и кижуча в бассейне р. Озерная Восточная и Ука приурочены к верхнему течению (особенно в р. Левая Озерная) в районе действующего Озерновского горнометаллургического комбината (ОГМК). В связи с этим, в конце августа – начале сентября 2024-2025 гг. выполнен комплекс мониторинговых исследований состояния среды обитания и воспроизводства лососевых рыб в водотоках, находящихся в зоне вероятного техногенного воздействия ОГМК.

Исследования ихтиофауны производились с использованием эхолота, фото и видео фиксации подводной камерой и отлова молоди мелких рыб сачком со вставкой мельничного газа с ячейей 1 мм. Полевые измерения производились *in situ* в местах проведения основного комплекса экспедиционных исследований. Для характеристики среды обитания рыб производились измерения мутности образцов природной воды использовали прибор фирмы «Hanna Instruments» модель HI 98703. Значения pH измеряли при помощи анализатора жидкости для оценки pH ЭКОСТАБ Модификация PH201, температуру воды - тестером фирмы HI 98318.

Анализ данных по видовому составу и биологии рыб, полученных во время проведения мониторинга в водотоках верхнего течения р. Озерная Восточная, свидетельствует, что в исследованном районе обитает 8 достаточно характерных для данного типа рек представителей ихтиофауны, четыре из которых являются тихоокеанскими лососями рода *Oncorhynchus*. Согласно результатам исследований, на обследованных участках верхнего течения р. Озерная Восточная (в том числе, реках Левая Озерная и Правая Озерная) в период сбора материала отмечены взрослые особи кеты, нерки, кижуча, микижи, северной мальмы, камчатского хариуса и молодь (сеголетки и двухлетки) кижуча, сеголетки нерки, кеты, чавычи и двухлеток северной мальмы.

Среди молоди представителей р. *Oncorhynchus* в уловах доминировали сеголетки (0+) кижуча стандартной длиной SL 31–82 мм с массой тела от 0.34 до 8.26 г, доля которых за весь период исследований в целом составила свыше 75% пойманных особей, тогда как на его двухлеток (1+) размером 87–114 мм с массой тела от 10.60 до 24.05 г приходилось всего 2.8% от всей выловленной молоди. Относительное количество сеголеток (0+) нерки длиной 28–60 мм с массой тела от 0.18 до 2.35 г в уловах достигало около 21% от числа пойманных рыб.

Поимка сачком вблизи стана в верхнем течении р. Поперечная (правый приток р. Озерная Восточная) в темное время суток одного экземпляра молоди длиной 40 мм и 22 экз. взрослых особей пестроногого подкаменщика *Cottus cf. poecilopus* размером 74–117 мм позволяет сделать предварительный вывод, что в настоящее время в этом водотоке отсутствует значительное загрязнение. Этот вид, как и некоторых других представителей рода, часто рассматривают, в силу требовательности к качеству среды обитания, как индикатор чистой воды (Аннотированный..., 1998; Коваль, 2024). Как оказалось, при детальном обследовании бассейна р. Озерная Восточная в верхнем течении, подкаменщик здесь является сравнительно обычным видом на отдельных локациях. Его отмечали в уловах как в прибрежье основного русла реки, так и в его притоках на глубинах от 0.2 до 0.8 м. Все места поимок характеризовались каменисто-песчаными грунтами. Температура воды в период исследований варьировала в пределах 8.1–14.6°C, скорость течения – 0.3–1 м/с, pH – 7.0–7.9, мутность 0.7–1.23 NTU и 0.09–0.16 мг/л (Болдырев и др., 2025).

В ходе обследования водотоков, вытекающих с окрестностей Озерновского горнометаллургического комбината (ОГМК), и смежном участке р.левой Озерной подкаменщик обнаружен не был. Только единичные экземпляры молоди этого вида SL 28–35 мм и массой 0.5–0.7 г были отмечены еще ниже на нескольких локациях в рр. Левая Озерная и Озерная Восточная на расстоянии 10–30 км от комбината. Отсутствие и упрощенная возрастная структура вида на этих участках свидетельствует, по-видимому, о его депрессивном состоянии в результате загрязнения водотока. В то же время в нескольких притоках р. Озерной Восточной, находящихся вне зоны воздействия комбината, как показали исследования, сохраняются устойчивые группировки подкаменщика. Об этом свидетельствует присутствие в уловах значительного количества разновозрастных особей SL 61–88 мм и массой 7.9–23.8 г (Болдырев и др., 2025).

Из других таксономических групп на нескольких участках отмечены разновозрастные особи трехиглой колюшки *Gasterosteus aculeatus* и пестроногого подкаменщика. В р. Поперечная поймана личинка тихоокеанской миноги *Lethenteron camchaticus*.

Как показали предварительные результаты анализа ихтиологического материала, собранного в текущем 2025 г. на рр. Озерная Восточная и Ука в районе ОГМК, они во многом перекликаются с прошлогодними данными, когда был обследован верхний участок речной системы р. Озерная длиной 47.7 км от ст. О-1 (лимнокрен р. Левая Озерная) до ст. О-16 (слияние р. Озёрная и р. Телямина) и верхний-средний участок русла р. Перевальная длиной 9,7 км от ст. О-3 (выше зоны вероятного воздействия ОГМК – 3.7 км выше устья руч. Нежный) до ст. О-11 (в зоне возможного воздействия ОГМК – 6 км ниже устья руч. Нежный). На подконтрольных участках рек была выполнена оценка плотности нагула и нереста, а также площадь нерестовых участков тихоокеанских лососей.

Наиболее благоприятная ситуация тогда с нерестом лососей сохранялась в лимнокрене р. Левая Озерная выше и ниже ст. О-1 – здесь нерестилища занимали около 50% площади водоема, плотность нереста достигала 1.0–1.5 тыс. экз. на 1 п. км водоема. Всего в лимнокрене общей длиной 3.1 км нерестилось в общей сложности $\approx$ 3.0–4.5 тыс. экз. кижуча, нерки и кеты, что по всей видимости в разы ниже потенциальной нерестовой емкости данного уникального нерестового водоема.

На участке русла р. Левая Озерная от ст. О-1 до ст. О-5 длиной 3.6 км ниже лимнокрена по прошлогодним данным нерестилось в общей сложности 1 тыс. экз. кижуча, нерки и кеты, что сопоставимо с наблюдениями 2024 г. Нерестовые участки занимали менее 10% площади

русла, что на порядок ниже потенциальной нерестовой емкости данного участка реки, обильно подпитываемому грунтовыми водами из лимнокрена.

На участке русла р. Левая Озерная от ст. О-5 до ст. О-13 длиной 12.3 км в зоне фактического воздействия ОГМК (сбросы сточных вод, поступающие через загрязненный сток руч. Хомут и руч. Эталонный) нерестилось не более 1-2 тыс. экз. кижуча, нерки и кеты, нерестовые участки занимали менее 5–10% площади русла, что на порядок ниже потенциальной нерестовой емкости данного участка реки.

Как и в прошлом году на нижележащих участках русла (от ст. О-13 до ст. О-16) наблюдались разреженные нерестовые скопления нерки и кеты, а также нерестовые и преднерестовые скопления кижуча. Но общую численность рыб можно оценить в пределах не более 2-3 тыс. производителей, а плотность нерестовых участков составляла в пределах 1-5% площади русла. Вместе с тем, на берегах и на дне реки повсеместно наблюдали снёнку горбуши и кеты. По характеру донных отложений можно предположить, что пригодная площадь для нерестилищ составляет до 50-80% русла, а средняя плотность нереста при благоприятных условиях может достигать >10–30 тыс. экз. горбуши на 1 п. км русла.

В реке Перевальная (верховья р. Ука) нерест тихоокеанских лососей в 2024 г. наблюдался лишь на самой нижней ст. О-11 (6 км ниже устья руч. Нежный, через который происходит привнос загрязняющих веществ в р. Перевальная с хвостохранилища ОГМК), где единично наблюдались производители нерки в брачном наряде. На остальных станциях (О-3, О-10) производители тихоокеанских лососей и гольца-мальмы отсутствовали.

Как и в 2025 г., в 2023 г. (Коростелев, Улатов, 2024) наиболее высокие плотности обитания молоди отмечены в чистых ручьях – притоках р. Перевальная и Левая Озерная – в руч. б/н / О-12 максимальная – 7.5 экз./м²; средняя – 0.75 экз./м², и в руч. б/н (правом притоке р. Перевальная в районе ст. О-11), где на приустьевом участке русла плотность обитания молоди достигала 8.8 экз./м² (при средней плотности 1.33 экз./м²). При этом в ихтиоценозе ручья помимо молоди гольца встречалась и молодь тихоокеанских лососей, в т.ч. кижуча и чавычи, что может свидетельствовать о том, что в р. Перевальная в районе ст. О-11 в 2022 г. (год, предшествующий году исследований) успешно отнерестились производители кижуча и чавычи. Относительно высока плотность населения молоди лососей в приустьевой зоне р. Правая Озерная в укрытиях под берегами максимальная – 10 экз./м²; средняя – 0.22 экз./м², а также во второстепенных пойменных протоках р. Левая Озерная на участке русла между станциями О-1 и О-13: максимальная – 5.0–6.6 экз./м², средняя – 0.5-0.6 экз./м². При этом в главном русле на участке р. Левая Озерная между станциями О-1 и О-13 плотность низка: максимальная – 0.13–0.16 экз./м²; средняя – 0.05-0.06 экз./м². В р. Перевальная плотность молоди лососей на порядок ниже, чем в р. Левая Озерная.

Предварительный анализ результатов обработки бентосных проб, собранных в 2025 г., констатировал низкие концентрации организмов, свидетельствующие о практически полностью уничтоженных или сильно нарушенных донных биоценозах (руч. Хомут (О-4), руч. Эталонный (О-6, О-7-1, О-7-2) и руч. Нежный (О-8, О-9)). Эти водотоки принимают сточные воды с объектов и промплощадок ОГМК (рудника, хвостохранилища, промплощадки ЗИФ, склада химреагентов и др.). По-видимому, сильное антропогенное воздействие испытывает и участок р. Перевальная ниже устья руч. Нежный (О-11). Практически во всех перечисленных водотоках отмечены повышенные концентрации тяжелых металлов. Молодь и производители рыб в этих водных объектах в местах отбора проб не отмечались. Молодь лососевых полностью отсутствовала в зонах прямого техногенного воздействия (ст. О-4, О-6, О-7-1, О-7-2, О-9) – в руч. Хомут, руч. Эталонный, руч. Нежный, где наблюдалось экстремальное загрязнение природных вод тяжелыми металлами. Для этих водотоков характерен постоянный вынос техногенных наносов, сильно измененный природный сток не только микроионов, но и макроионов.

Работа выполнена в рамках государственного задания КФ ТИГ ДВО РАН «Структурно-функциональная организация, динамика и продуктивность наземных и прибрежных экосистем

на Дальнем Востоке РФ. Разработка научных основ и экономических инструментов устойчивого природопользования» (№ ЕГИСУ 124012700496-4).

Список литературы:

Аннотированный каталог круглоротых и рыб континентальных вод России. М.: Наука, 1998. 220 с.

Болдырев В.С., Яковлев С.В., Мишин Д.В. Пестроногий подкаменщик *Cottus cf. poecilopus* в верхнем течении реки Озерной Восточной. Современные условия существования и перспективы выживания // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Материалы XXV Всероссийской научной конференции (Петропавловск-камчатский, 14-15 ноября 2024 г.). Петропавловск-Камчатский, М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2025. С. 36–40. DOI: 10.53657/KBPGI041.2025.70.17.004.

Введенская Т.Л., Улатов А.В. Обзор результатов исследований состояния лососевых водных объектов с различной степенью антропогенной нагрузки в Камчатском крае // Труды ВНИРО. 2015. Т. 157. С. 173–188.

Коваль М.В. Эстуарная ихтиофауна Камчатки: условия формирования, видовое разнообразие и экологическая характеристика // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. 2024. Вып. 72. С. 9–235. DOI:10.15853/2072-8212.2024.72.9-235.

Коростелев С.Г., Улатов А.В. Данные исследований 2023 г. по воздействию Озерновского горнометаллургического комбината (ОГМК) на состояние ихтиофауны рек Озерная Восточная и Ука (Северо-Восточная Камчатка) // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Материалы XXV Всероссийской научной конференции (Петропавловск-камчатский, 14-15 ноября 2024 г.). Петропавловск-Камчатский, М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2024. С. 168–175. DOI: 10.53657/KBPGI041.2024.28.37.029.

Коростелев С.Г. Таксономическое разнообразие ихтиофауны бассейна реки Озерная восточная (полуостров Камчатка) // РЕГИОНЫ НОВОГО ОСВОЕНИЯ: поворот на «восток» и окружающая среда – грани взаимодействия. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. 1–3 октября 2025 г., г. Хабаровск. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2025. С. 89.

Токранов А.М. Ихтиофауна бассейнов рек Озерная Восточная и Ука (Северо-Восточная Камчатка) и проблема ее сохранения // Материалы Международной научно-практической конференции 23–26 апреля 2025 года / отв. ред. Д. А. Субетто, А. Н. Паранина. Санкт-Петербург: Издательство РГПУ им. А. И. Герцена, 2025 С. 112–117.

Шейко Б.А., Федоров В.В. 2000. Класс Cephalaspidomorphi – Миноги. Класс Chondrichthyes – Хрящевые рыбы. Класс Holocerphali – Цельноголовые. Класс Osteichthyes – Костные рыбы // Каталог позвоночных животных Камчатки и сопредельных морских акваторий. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор. С. 7–69.

УДК: 549.28:551.326.83 (282.257.5)

ВЛИЯНИЕ УРБАНИЗАЦИИ И НАВОДНЕНИЙ НА ГЕОХИМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ МИГРАЦИЮ В ДОЛИНАХ РЕК ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Махинова А.Ф.¹, Махинов А.Н.¹, Liu Shuguan²

¹Институт водных и экологических проблем ХФИЦ ДВО РАН, Хабаровск, Россия
makhinova@ivep.as.khb.ru

²Tongji University, Sipin st. 1239, Shanghai, China 200092, *liusgliu@tongji.edu.cn*

Аннотация. Рассматривается сток наносов рек Амур и Янцзы. Описана роль наводнений в концентрировании загрязняющих веществ и механизмы миграции Fe, Mn, Zn, Cu, Pb в составе органических коллоидов и растворимых комплексных солей. Исследованы процессы массопереноса взвеси в речных потоках и их влияние на загрязнение рек.

Ключевые слова: река Амур, наводнение, паводковая волна, поток наносов, почвенно-геохимические потоки, река Янцзы.

ВВЕДЕНИЕ

Частые наводнения на крупных реках Восточной Азии играют важную роль в переносе терригенного материала и химическом загрязнении русел. Крупные паводки активизируют русловые процессы и увеличивают объем стока наносов. Размыв берегов и пойменных земель определяют широкий спектр загрязняющих веществ в русле, что делает сложным анализ структуры химических соединений и не позволяет однозначно описать механизмы взаимодействия в многокомпонентной системе природных вод.

В последние годы крупные реки Восточной Азии (Амур-Уссури, Янцзы, Ляохэ, Сунгари) вступили в фазу высокой водности. Подъем уровня воды в реках сопровождается высокой активностью русловых деформаций берегов и выносом терригенного материала в долину (Makhinov et al., 2012). Вовлечение земель в сельскохозяйственное производство, строительство гидроузлов и вдольбереговых паводкозащитных дамб влияет на гидрологический режим рек и динамику гидрохимических показателей воды. Пойма в нижнем течении Амура занимает площадь около 7500 км². Большая часть ее поверхности имеет относительный средний уровень высоты около 1.5–3 м над меженным урезом воды. Продолжительность паводков и глубина затопления не позволяет повсеместно использовать земельные ресурсы.

Земельные ресурсы поймы Янцзы используются повсеместно. При затоплении поймы происходит выщелачивание химических элементов и вынос их паводковой волной в русло. Одним из источников загрязнения в российской части бассейна Амура являются города. Сброс сточных вод городов Хабаровска, Амурска и Комсомольска-на-Амуре составляет около 300 млн м³ или около 80% от всех стоков в пределах Хабаровского края. Из них 43.5 млн м³ – неочищенные стоки. Ведущая роль в загрязнении реки Янцзы принадлежит городам Нанкин и Ухань.

ПРЕДМЕТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованы русловые процессы похожих участков рек Амура и Янцзы при прохождении высокой паводковой волны. Химический состав речных наносов оценивали по результатам спектрального анализа с использованием метода ICP OES (эмиссионно-спектрометрический с индуктивно связанной плазмой на Спектроскане No 835-Lif 200).

Использованы методы: а) сравнительного анализа и географической интерполяции для построения вероятностных зон миграции элементов; б) математического моделирования для описания процессов миграции химических компонентов и в) общепринятые методы вариационной статистики. Основной объем материалов был собран в 2013–2014 в процессе выполнения работ по проекту «Экологические критерии и ограничения в программах устойчивого природопользования бассейна р. Амур» и в рамках программы НИР, дополнен

материалами исследований проекта 12-I-O-ОНЗ-13 «Опасные гидрологические явления в бассейне Амура» (2019-2022). В паводок пробы отбирались при расходах воды, которые достигали своих максимальных значений при уровне по Хабаровску 607 см. Отбор проб воды проводился в два периода: летом в конце июля 40 проб и начале октября 20 проб (рис. 1, 2).

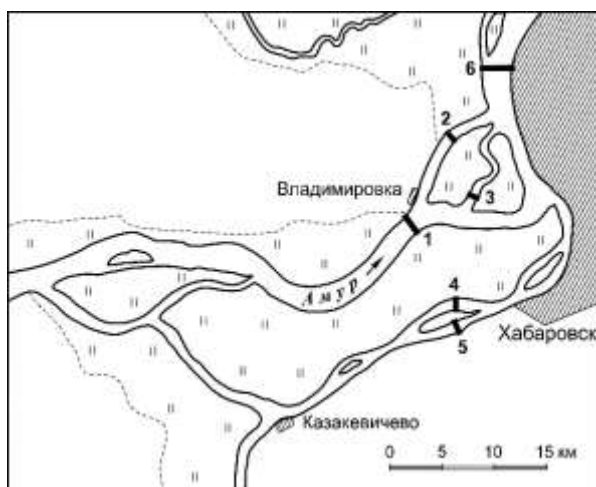


Рис. 1. Река Амур около г. Хабаровска (1–6) – створы наблюдений



Рис. 2. Точки отбора проб ниже города

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водный режим и сток наносов в период наводнения. Реки Восточной Азии относятся к единому дальневосточному типу внутригодового распределения стока воды и имеют близкие характеристики по многим параметрам. На них ярко выражена многолетняя изменчивость стока воды и наносов. Густота речной сети и особенности водосборной площади этих рек способствуют высокой обеспеченности расходов воды и в определенных условиях быстрому развитию паводковой волны (табл. 1).

Таблица 1. Основные гидрологические характеристики рек Амура и Янцзы.

Средние гидрологические характеристики	Амур	Янцзы
Сток максимальный годовой, км ³	369.1	924.0
Сток воды средний многолетний, км ³	459.2	1359.2
Сток минимальный годовой, км ³	135.0	696.9
Максимальный расход воды, м ³ /с	46200.0	92600.0
Минимальный расход воды, м ³ /с	153.0	36000.0
Средний годовой сток наносов, млн т	24.0	505.4
Средняя годовая мутность воды, мг/дм ³	90.0	—
Максимальная мутность воды, мг/дм ³	517.0	

Максимальная скорость течения воды в Амуре в паводок 2013 г. достигала 5, а в Янцзы -6.6 м/с. Выход воды на пойму со скоростью 2.5–3.0 м/с при глубине потока 1.8–3.0 м активизирует размыв берегов и вынос большого объема аллювия в русло реки. Русловые процессы Янцзы в отсутствии дамбы размывают берега более мощным потоком и выносят аллювий в пойму и русло (Liu Shuguan, 1999).

Самая высокая водность на Амуре и Янцзы случается в условиях одновременного ливневого характера дождей на притоках верхней и средней частях бассейнов, что способствует быстрому подъему воды и развитию высокой скорости движения паводковой волны.

Оценка массопереноса взвешенных наносов в русле рек. Среднесуточная масса взвеси, переносимая в паводки на участке между городами Хабаровск–Комсомольск-на-Амуре составляет около 5.1×10^5 тонн. В фазу подъема паводка мутность воды в реке возрастает в 2.5–3.5 раза. Для определения переноса массы твердого вещества (G) через поперечное сечение турбулентного потока при известных расходах воды и значениях средней глубины потока использовали уравнение (Шмакова, 2018): $G = kQV_1L[C/hg - 10^3(1-f)]/dt$, где k – коэффициент пересчета массы твердого вещества в пробе воды к его истинной массе; Q – расход воды, m^3/c ; V_1 – средняя скорость потока в поверхностном слое, m/c ; L – расстояние между расчетными створами, m ; C – скорость седиментации в водном потоке, $kg/(m \cdot c^2)$; h – средняя глубина потока, m ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; f – коэффициент трения в придонном слое; I – уклон дна; 10^3 – плотность воды, kg/m^3 ; t – время, $сек$.

Расчеты определения общей массы взвешенных наносов ($ВВ$, mg/dm^3) в потоке при прохождении паводка 2021 г. на реке Амур проводили при определенных допущениях, когда $f > 1$ (для Амура - $h \geq 8$ м, $V_1/V_2 \geq 10$, где V_2 – скорость придонного течения) (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика стока реки Амур в паводки 2020, 2021 гг. (средние значения).

№прп	Параметры потока в русле		Показатели стока в поперечном сечении русла, мг/дм ³			Gcp (Gf+Gfp) мг/дм ³	Gm/Gcp	Цв, град	УЭП, μs/cm
	V(м/с) max/min	L, м	Gm BB>1 мкм	Gf(max/min) 0.45-1 мкм	Gfp <0.45мкм				
Русло Амура, выше Хабаровска, ширина русла 2425 м (L- расстояние от уреза правого берега, м)									
1	2.4/2.2	75	262.8	1.2/0.7	11.9	13.1	20.06	45	86.6
2	2.8/2.7	220	158.9	1.1/0.8	11.5	12.6	12.61	45	97.7
3	3.1/2.9	480	144.7	1.3/1.0	11.2	12.5	11.58	75	87.9
5	3.1/3.0	1230	41.5	0.8/1.5	11.3	12.1	3.43	85	75.2
Русло Амура, ниже г. Хабаровск, ширина русла 1920 м (L-расстояние от уреза левого берега, м)									
8	2.6/2.	135	166.3	4.7/0.9	12.1	16.8	9.72	85	78.3
9	3.4/3.0	445	176.2	3.8/0.4	12.0	15.8	11.15	85	101.2
10	3.6/3.1	880	185.1	2.9/0.5	11.8	14.7	12.59	65	112.1
11	3.7/3.1	1190	70.2	1.8/0.4	9.8	11.6	6.05	55	103.9
14	3.9/3.1	1500	159.1	1.9/0.8	7.0	8.9	17.88	59	103.8

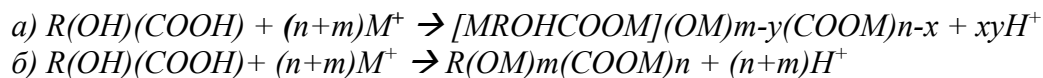
Gm – терригенный сток; Gf – сток растворенных коллоидных форм $ОВ$; Gfp – сток растворенного $ОВ$; Gcp – истинно растворенное $ОВ$; Определение различных форм $ОВ$ и УЭП выполнила Левшина С.И. (ИВЭП ДВО РАН)

Геохимическая активность химических соединений и роль органического вещества в их миграции. Распределение и миграция химических элементов в природных водах осуществляется в виде комплексных соединений с органическим веществом различной молекулярной массы (Шулькин, 2021). Растворимые гумусовые кислоты и их комплексы с тяжелыми металлами имеют аномально высокую подвижность среди абиотических компонентов водных экосистем. Связывая ионы металлов в комплексные соединения, органическое вещество различной природы способствует его нахождению как в растворенном, так и во взвешенном состоянии, повышая тем самым их концентрацию и миграционную подвижность. Максимальный вклад в образование истинно растворимых органоминеральных комплексов вносят фульвокислоты.

Подтопление болот паводковыми водами, обогащенными кислородом, способствует интенсификации деятельности микроорганизмов и увеличению фракционирования органического вещества. Образуются крупноколлоидные фракции – хелаты и растворимые агрессивные фракции фульвокислот (Linnik et al., 2012). Вынос большой массы органического

вещества в русло Амура способствует: а) растворению и сорбции-десорбции загрязняющих веществ, поступающих в результате смыва паводковой волной с урбанизированных и сельскохозяйственных территорий (калийные соли, мочевины, фосфаты, нитраты); б) ионному обмену между комплексными солями и хелатами с образованием гидроксокомплексов $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ или аммиакатов $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$.

Загрязняющие вещества, поступающие с бытовыми стоками с урбанизированных территорий, диссоциируют как электролиты на комплексные ионы и ионы внешней сферы (например: $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]=3\text{K}^+ + [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$). Комплексные ионы железа $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$, образующиеся в результате диссоциации способны к химическому взаимодействию с агрессивными фракциями фульвокислот с образованием двойных комплексных (а) или гетерополярных солей (хелатов) (б):



Однако концентрации фульвокислот, зависящие от интенсивности развития биотической компоненты в воде, в определенных условиях могут быть несоизмеримо ниже концентраций крупных органических коллоидов. В суммарном химическом стоке исследованных соединений металлов, большое значение имеет сорбционная активность не только органических коллоидов, но и минеральных (70–100 нм). Однако механизмы сорбции различны.

Сорбция, как электростатическое притяжение электрически нейтральных атомов и их соединений происходит на поверхности минеральных частиц с огромной удельной поверхностью ($\text{м}^2/\text{г}$) и высоким отрицательным зарядом (Шулькин, 2021). Чаще всего здесь сорбируются гидроксоаквакомплексы $[\text{Mn}(\text{OH})_2(\text{OH}_2)]^0$ или аммиакаты $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2^0$, где комплексообразующие ионы (Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+}) прочно удерживают внешнюю сферу за счет неподеленных электронных пар лигандов.

Органические коллоиды обладают большей комплексообразующей способностью к комплексным катионам $[\text{FeHSO}_4]^+$, $[\text{CuHSO}_4]^+$ и в условиях высокой мутности образуют органо-минеральные комплексы. Агрессивные фракции фульвокислот с молекулярной массой <2.0 кДа связывают ионы металлов Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} в органо-минеральные комплексы путем химического взаимодействия. Растворимые органо-минеральные комплексы нестойкие, они вступают в реакции ионного обмена с конкурирующими соединениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены механизм концентрирования и некоторые закономерности миграции химических соединений в русле Амура во время паводков. Выявлено, что масса терригенного материала фракций 0.001–0.05 мм в створах русла около Хабаровска в период крупных наводнений увеличивалась в 1.5–1.7 раза относительно средних показателей в летнюю межень, а доля органического материала в 2.0–4.4 раза. Обнаружено, что большая часть соединений Fe, Mn, Al, Cu, Zn вдоль левобережья мигрирует в составе хелатов (коллоиды размером 0.45–1.0 мкм), содержание которых пропорционально взвеси органических веществ. Снижение концентраций хелатов способствует химическому взаимодействию малоподвижных элементов с агрессивными фракциями фульвокислот и их миграции в растворимой форме.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по федеральному проекту № 126031118637-5 и проекту № 41372240 Национального научного фонда Китая (NSFC).

Список литературы:

Шмакова М. В. Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб: Изд-во «ВВМ», 2018. 147 с.

Шулькин В.М. Роль крупных коллоидов в химическом составе речных вод на примере рек юга Дальнего Востока РФ) // Материалы XII Совещания географов Сибири и Дальнего Востока, 28 сентября – 1 октября 2021 г. С. 105–108.

Linnik P.N., Zhezherya V.A., Linnik R.P., Ivanechko Ya.S. Influence of the component composition of organic substances on the ratio of dissolved forms of metals in surface waters // J. Hydrobiological journal. 2012. Vol. 48. No. 5. Pp. 97–114.

Liu Shuguan. Comparative analysis of channel processes on big rivers of Russia and China, Cand. diss. theses. Moscow: MSU, 1999.

Makhinov A., Liu S., Kim V., Makhinova A. Natural risks and antropogenic impacts on big rivers in East Asia // Proc. 32nd International Geographical Congress. Cologne, Germany, 2012. P. 238.

УДК 911.9

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ РЕКИ
АРГИЧИ (БАССЕЙН ОЗЕРА СЕВАН, АРМЕНИЯ)**

Маргарян В.Г.¹, Фролова Н.Л.², Гайдукова Е.В.³, Мисакян А.Э.⁴, Фрунзикян О.Б.⁵

¹Ереванский государственный университет, Ереван, Армения, vmagaryan@ysu.am

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия,
frolova_nl@mail.ru

³Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт Петербург,
Россия

⁴«Центр гидрометеорологии и мониторинга» ГНКО, Ереван, Армении

⁵«Центр экспертизы воздействия на окружающую среду» ГНКО, Ереван, Армения

Аннотация. На примере р. Аргичи – наиболее самой длинной и многоводной реки в бассейне Севана рассмотрены современные особенности ледообразования за период 1938/39–2024/25 гг., с учетом изменения климатических условий в данном речном бассейне. Исследование современного климата и различных фаз ледового режима проводилось на основе фактических данных наблюдений, проводимые Армгидрометом, для замыкающего створа Геташен и метеостанции Мартуни с начала наблюдений до 2025 г. включительно.

Ключевые слова: р. Аргичи, бассейн оз. Севан, Армения, климатическая условия, зимняя температура воздуха, ледовые процессы

В условиях современных изменений климата возрастает актуальность систематических исследований ледового режима рек (Агафонова и др., 2014; Банщикова и др., 2016; Вуглинский, 2014; Зуев и др., 2024; Маргарян, 2021; Маргарян и Вершинин, 2021; Маргарян и др., 2025б).

Цель работы – комплексное исследование особенностей ледового режима р. Аргичи – притока озера Севан с учетом влияния климатических условий для всего периода наблюдений.

Река Аргичи – самая длинная и полноводная река озера Севан (длина – 51 км, средний многолетний годовой расход воды – 5.6 м³/с.). Река берет начало у подножия горы Гндасар, из двух крупных источников (на высоте 2660 м, течет на север и примерно в 6,0 км ниже села Верхний Геташен впадает в озеро Севан. Средняя высота водосборного бассейна 2470 м, а площадь – 366 км² (Маргарян и др., 2025а; Ресурсы поверхностных ..., 1973).

В качестве исходной информации в работе использованы фактические данные наблюдений за ледовым режимом р. Аргичи на гидрометрическом посту Геташен за период 1938/39–2024/25 гг., проводимые Армгидрометом, и результаты полевых работ. Для климатических условий использовались данные метеорологической станции Мартуни (с момента открытия до настоящего времени), а также среднесуточные значения температуры воздуха и воды, количество осадков непосредственно на наблюдательном пункте Геташен за период 2011/12–2024/25 гг. На р.Аргичи в разные годы действовало 2 гидрометрических пункта наблюдений (табл. 1). Пост р. Аргичи – п. Неркин Геташен не функционирует с 1 августа 1969 года, в настоящее время действуют только один пост, то есть р. Аргичи – п. Верин Геташен.

В процессе исследования применены методы гидрологической аналогии, интерполяции, экстраполяции, картографирования, а также стандартные методы статистического анализа.

Климатические характеристики в бассейна оз. Севана в последние десятилетия подвержены значительным изменениям, что, безусловно, отражается на ледотермическом режиме данного водного объекта (Маргарян и др., 2022; Маргарян, Фролова, 2021; Margaryan et al., 2025а).

Таблица 1. Мониторинг наблюдений за водным режимом р. Аргичи.

№ п/п	Река – пункт наблюдений	Расстояние от устья реки, км	Основные характеристики водосбора		Сведения о работе пункта		Высота нуля графика, м БС
			площадь км ²	средняя высота, м	открыт день, месяц, год	закрыт день, месяц, год	
1	Аргичи – Неркин Геташен	18.0	326	2500	25/04/1959	01/08/1969	2245.14
2	Аргичи – Верин Геташен	5.5	366	2470	26/08/1936	действует	1942.29

По фактическим наблюдениям, проведенным в районе р. Аргичи–Геташен, значения средних температур воздуха за период ноябрь–апрель колеблются от –6.0 до 5.4°C, величины числа дней с температурами воздуха выше 0°C – от 1 до 29, суммы положительных температур – от 0.4 до 166°C, а средних температур воды – от 1.7 до 4.6°C (табл. 2). Сумма осадков в среднем за период 2011/2012–2024/2025 гг. варьируется в пределах от 22 до 50 мм, а число дней с осадками от 0.1 мм и выше – от 4 до 8 дней.

Таблица 2. Климатические характеристики реки Аргичи в створе Геташен, 2011/12–2024/2025 гг.

XI	XII	I	II	III	IV	За период ноябрь–апрель
средняя температура воздуха, °C						
0.9	-4.4	-6.0	-5.2	-0.7	5.4	-1.7
число дней с температурами воздуха выше 0°C						
20	5	1	3	16	29	12
суммы положительных температур, °C						
53.9	6.9	0.4	3.0	38.3	165.9	268
средняя температура воды, °C						
3.3	2.0	1.7	1.8	2.5	4.6	2.7
сумма атмосферных осадков, мм						
24	22	28	22	50	43	190
число дней с осадками от 0.1 мм и выше, дней						
4	5	6	5	8	8	6

Исследования показывают, что за период 2011/12–2024/25 гг. в холодное время года в районе гидрометрического поста Геташен наблюдается заметное повышение температуры воздуха и воды, числа дней с температурами воздуха выше 0 °C, суммы положительных температур, числа дней с осадками от 0.1 мм и выше, уменьшение количества осадков. Даты начала ледовых явлений для изучаемой реки смещаются на более поздние, а даты окончания - сдвигаются на более ранние сроки, сократилась продолжительность ледовых явлений.

Аналогичные закономерности характерны и для метеорологической станции Мартуни за период 1926/27–2024/2025 гг., за исключением количества осадков (Margaryan et al., 2025a). Однако, уменьшение количества осадков на метеорологической станции Мартуни характерно для периода 2011/12–2024/25 гг.

С 1938/39 по 1984/85 гг. для р. Аргичи–Геташен характерно появление ледовых явлений различных типов. В основном на реке наблюдались забереги, редко – шугоход, ледоход, сало, ледостав. На исследуемой реке не наблюдались заторы и зажоры. В табл. 3 представлены даты начала и окончания заберегов, продолжительность их существования. Шугоход наблюдался в 1943/44, 1946/47–1949/50, 1956/57 гг. (в среднем 7 дней), ледоход – в 1939/40, 1940/41, 1945/46, 1947/48, 1959/60 гг. (в среднем 3 дней), сало – 1947/48, 1948/49 гг. (в среднем 2 дня), ледостав – 1939/40 г. (один день). Начиная с 1984/85 года, на р. Аргичи–Геташен не зафиксированы ледовые явления, что связано с изменением климатических условий.

Таблица 3. Характеристика ледового режима р. Аргичи в створе Геташен, 1938/39–1984/85 гг.

Средняя дата начала появления заберегов	Средняя дата окончания заберегов	Продолжительность существования заберегов, дни
19/12	11/03	67

Начало ледовых явлений (забереги) на р. Аргичи–Геташен преимущественно наблюдается с третьей декады ноября по третью декаду декабря, а окончание – со второй декады февраля по вторую-третью декаду марта, а в холодные зимы – иногда даже до середины апреля. Продолжительность заберегов в среднем составляет 67 дней.

Так, в результате исследований выяснено, что в современных климатических условиях, начиная с 1984/85 года, на р. Аргичи–Геташен не зафиксировано появления ледовых явлений. С 1938/39 по 1984/85 гг. на реке в основном наблюдались забереги, и только в очень холодные зимы также шугоход, ледоход, сало, ледостав, появление воды на поверхности льда. В течение этого периода наблюдалось изменение в датах начала и окончания существования заберегов, и следовательно сокращение его продолжительности. Наши исследования в различных речных бассейнах республики также подтверждают этот факт (Маргарян, 2016; 2021; Маргарян и др., 2025б, г; Margaryan, 2016; Margaryan et al., 2025b, c).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке Республики Армения в рамках научного проекта 24WS-1E035.

Список литературы:

- Агафонова С.А., Айбулатов Д.Н., Фролова Н.Л., Козлов Д.В. Современное изменение ледового режима рек бассейна Волги // *Природообустройство*. 2014. № 3. С. 60–62.
- Банщикова Л.С., Банщиков А.А., Соболев М.В., Хвалев С.В. Ледовый режим рек Пестовского района Новгородской области // *Природообустройство*. 2016. № 3. С. 20–25.
- Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География*. 2014. № 3. С. 32–45.
- Зуев В.В., Уйманова В.А., Павлинский А.В. Современные особенности ледового режима Нижнего Енисея // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2024. № 3. С. 101–113. DOI:10.35567/19994508-2024-3-101-113.
- Маргарян В.Г. Особенности ледовых явлений и динамика их изменения рек бассейна Дебет (на территории Республики Армения) // *Труды V Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России»*, г. Владимир, 11–14 октября 2016 г. 2016. С. 294–301.

Маргарян В.Г. Ледовый режим рек бассейна Дебед, Армения // Лёд и Снег. 2021. № 61(2). С. 248–261. DOI:10.31857/S2076673421020086

Маргарян В.Г., Аветисян Г.Д., Саргсян А.Т., Маргарян П.Н. Закономерности пространственно-временного распределения абсолютных минимальных температур приземного слоя воздуха в бассейне озера Севан // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Том 86. № 2. С. 232–242. DOI:10.31857/S2587556622020078

Маргарян В.Г., Вершинин Д.А., Захарян С.А. Изменение климата и его проявления в ледовом режиме рек Республики Армения (рек бассейна озера Севана) // XVI Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатно-экологическому мониторингу: Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, 16-20 сентября 2025 г., Томск / Под ред. Е.А. Головацкой. Томск: Изд-во Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 2025. С. 178–181.

Маргарян В.Г., Гайдукова Е.В., Аветисян Г.Д., Фрунзикян О.Б. Чувствительность зимнего ледово-термического режима реки Аргичи к современным климатическим изменениям // Сборник «Труды XIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2024)», 2025. Том I.

Маргарян В.Г., Гайдукова Е.В., Субирос Дж. В., Фрунзикян О.Б., Мисакян А.Э. Физические процессы формирования зимнего речного стока и влияние на него ледовых явлений в бассейне озера Севан // Ученые записки ЕГУ: геологические и географические науки. 2025. Т. 59(2). С. 386–399. DOI: 10.46991/pysuc.2025.59.2.386

Маргарян В.Г., Фролова Н.Л. Оценка пространственно-временной изменчивости зимнего минимального декадного стока рек бассейна озера Севан в условиях современного изменения климата // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 1. С. 97–108. <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/808>

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 9, бассейн р. Аракса, вып. 2 / Под ред. А.П. Муранова. М.: Гидрометеиздат, 1973. 472 с.

Margaryan V.G. The change dynamics and evaluation of ice phenomena of the rivers of Kura basin (in the territory of the Republic of Armenia) in the context of global climate change // Summaries book. 18th international congress African Water Association. “Sustainable access to water and sanitation in Africa”. From 22nd to 26th February 2016 KICC / Nairobi – Kenya. Pp. 157–159.

Margaryan V.G., Frolova N.L. & Gaidukova E.V. Minimum Winter Ten-Day Runoff in Rivers of the Lake Sevan Basin // Water Resour. 2025. № 52. Pp. 1108–1119. DOI:10.1134/S0097807825700228

Margaryan V., Gaidukova E., Qelyan S., Misakyan A., Frunzikyan H. Ice Regime of Rivers Flowing into Lake Sevan, 2020/21–2024/25 // Special Issue of the Journal of Innovative Solutions for Eco-Environmental Sustainability, dedicated to the International Conference on “Biological Sciences and Environmental Solutions for Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs),” held from September 24–26, 2025, at Yerevan State University, Armenia, p. 153. DOI: 10.46991/JISEES.2025.SI1.

Margaryan V.G., Misakyan A.E., Frunzikyan H.B., Frolova N.L. Assessment of the Ice Regime of the Rivers of the Debed Basin // Book of Abstracts: ICCARUS 2025. 10 to 14 March, 2025. Pp. 38–39. DOI: 10.5676/DWD pub/nwv/iccarus 2025.

УДК 004.9

РАЗРАБОТКА ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ПРИТОКА ВОДЫ К ВОДОХРАНИЛИЩАМ В РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Морейдо В.М., Иглин С.М.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, vsevolod.moreydo@iwp.ru

Аннотация. В работе представлены две прогностические системы на базе модели ЕСОМАГ: первая использует данные метеостанций и архивные сценарии для ансамблевого прогноза притока в Чебоксарское водохранилище, вторая — глобальный реанализ и сезонные метеопрогнозы для бесшовного прогнозирования в трансграничном бассейне Иркутского водохранилища. Показаны оценки качества прогнозов за проверочный период, которые позволяют высоко оценить эффективность прогноза, особенно при использовании открытых данных.

Ключевые слова: долгосрочные гидрологические прогнозы, водохранилища, гидрологическое моделирование, управление водными ресурсами

Эксплуатация водохранилищ крупных и крупнейших ГЭС направлена на удовлетворение потребностей населения и промышленности в энергетических и водных ресурсах. Ключевая проблема обеспечения их бесперебойной работы кроется в необходимости перераспределения водных ресурсов во времени в условиях стохастической изменчивости речного стока. Положение зачастую усугубляет недостаток своевременной гидрометеорологической информации с водосборов, связанный с сокращением наблюдательной сети и особенно остро стоящий на трансграничных реках. Решением, зарекомендовавшим себя в мировой практике, является применение физико-математических моделей гидрологического цикла суши в качестве ядра прогностических и моделирующих систем (Gelfan et al., 2018; Mendoza et al., 2017). Данный подход позволяет эффективно планировать эксплуатационные режимы ГЭС, адаптируясь к различным гидрологическим условиям и компенсируя неопределенность исходных данных (Морейдо и др., 2020).

Интеграция гидрологических моделей в процессы управления водохранилищами обусловлена принципиальной невозможностью эффективного регулирования стока исключительно на основе ретроспективных статистических данных или оперативной информации с ограниченной заблаговременностью, особенно в условиях региональных проявлений глобальных климатических изменений. Стохастическая природа речного стока, формируемого под влиянием сложного комплекса метеорологических факторов и подстилающей поверхности, требует применения детерминированно-вероятностного подхода к его описанию. Физико-математические модели гидрологического цикла позволяют воспроизводить процессы трансформации осадков в сток на водосборе, учитывая пространственно-распределенную информацию о рельефе, почвах, растительности и текущем состоянии увлажненности территории. Это дает возможность перейти от пассивной реакции на складывающуюся водохозяйственную обстановку к упреждающему управлению режимами наполнения и сработки водохранилища (Борщ и др., 2017). До недавнего времени использование метеорологических прогнозов на период заблаговременности было ограничено ввиду их качества, поэтому в гидрологическом прогнозировании были широко разработаны методы применения и оценок использования архивных метеорологических наблюдений в качестве сценариев воздействия на речной водосбор в его текущем состоянии на период заблаговременности (Day, 1985; Gelfan et al., 2018; Морейдо, 2017). С появлением сезонных метеорологических прогнозов их использование в задачах гидрологического прогнозирования усилилось (Boucher, Ramos, 2019; Prudhomme et al., 2024).

Применение прогнозов притока воды, полученных на основе таких моделей, является ключевым условием для решения оптимизационной задачи долгосрочного и краткосрочного планирования. Наличие достоверного прогноза с достаточной заблаговременностью

позволяет минимизировать холостые сбросы воды в многоводные периоды и сократить дефицит выработки электроэнергии в маловодные, одновременно гарантируя соблюдение санитарных попусков и требований других водопользователей (Мотовилов и др., 2017). В условиях трансграничных рек, где получение оперативной измерительной информации с территории сопредельного государства затруднено или задержано, моделирование выступает в роли компенсаторного механизма, восполняющего пробелы в данных путем использования глобальных метеорологических реанализов и прогнозов, а также спутниковой информации о состоянии водосбора. Таким образом, современные гидрологические модели служат не просто инструментом расчета, а фундаментальной основой для создания систем поддержки принятия решений, обеспечивающих экономическую эффективность, энергетическую безопасность и экологическую устойчивость функционирования гидроузлов в условиях неопределенности и изменяющегося климата.

В настоящей работе показано применение различных комбинаций физико-математических моделей формирования стока на водосборе и статистических моделей для прогнозирования притока воды в водохранилища в сочетании с исходными данными наблюдений, атмосферного реанализа и метеорологических прогнозов в рамках разработанных прогностических систем. Для всех описанных систем в качестве расчетного ядра формирования речного стока выступает программный комплекс ECOMAG, разработанный в ИВП РАН (Мотовилов, 2016 а, 2016 б).

Для функционирования первой системы прогноза притока воды в Чебоксарское водохранилище используются данные наблюдений на 167 метеорологических станциях в бассейне самого водохранилища и его притоков (Борщ и др., 2017; Морейдо, 2017). С помощью модели формирования стока рассчитывается состояние влагозапаса в бассейне по данным оперативных наблюдений на метеостанциях за период, предшествующий дате выпуска прогноза. После этого в модель формирования стока в качестве входных данных подаются метеонаблюдения за предыдущие годы в составе ансамбля из 51 сценария хода метеозлементов на период заблаговременности прогноза (до 3 месяцев). Такова методика ансамблевого долгосрочного прогноза (Day, 1985; Gelfan et al., 2018; Морейдо, 2017), которая позволяет на основании сценариев развития гидрологической обстановки получить прогноз характеристик притока соответствующей заблаговременности в детерминистической и вероятностной форме путем обработки полученной совокупности сценариев как распределения случайных величин. Оценка качества прогноза за последние 10 лет составляет для объема притока воды во II квартале: коэффициент корреляции $R = 0.91$, среднеквадратическая ошибка $RMSE = 2.8 \text{ км}^3$, отношение ошибки к стандартному отклонению величины притока $S/\sigma = 0.38$. Для максимальных расходов эти характеристики составляют, соответственно, $R = 0.94$, $RMSE = 1224 \text{ м}^3/\text{с}$, $S/\sigma = 0.49$. Следует отметить, что одним из вызовов, стоящих перед системой ансамблевого долгосрочного прогнозирования в настоящее время является нестационарность климата, которая проявляется в том числе в изменении характера прохождения весеннего половодья (Kalugin, 2019), что сокращает возможности для использования архивных сценариев до 1990 года.

Другим примером построения современной системы долгосрочного прогноза, организованной с помощью модели формирования стока ECOMAG, является система оперативного бесшовного прогнозирования притока воды в Иркутское водохранилище заблаговременностью до 60 суток в теплый период года (с мая по октябрь). В силу трансграничного расположения бассейна озера Байкал, определяющего приток в Иркутское водохранилище, построить оперативную систему здесь на основании данных наблюдений на сети метеорологических станций было невозможно. В этой связи был использован глобальный атмосферный реанализ ERA5Land (Muñoz-Sabater et al., 2021) для расчета характеристик влагозапаса на водосборе притоков озера Байкал. В качестве прогностической информации был взят сезонный метеорологический прогноз ECMWF (C3S, 2025), который не так давно стал доступным в оперативном режиме с метеорологическими данными заблаговременностью 7 месяцев. Результатом оценки построенной прогностической системы для теплого периода

является RMSE 1329 м³/с и отношение $S/\sigma = 0.52$ за проверочный период с 2017 по 2023 годы. Этот результат показывает возможности для построения прогнозных систем на открытых данных.

Список литературы:

Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) (Электронный ресурс) / C3S. <https://cds.climate.copernicus.eu/>

Kalugin A.S. The Impact of Climate Change on Surface, Subsurface, and Groundwater Flow: A Case Study of the Oka River (European Russia) // *Water Resources*. 2019. Vol. 46. No. S2. Pp. S31–S39. DOI:10.1134/S0097807819080104.

Boucher M.-A., Ramos M.-H. Ensemble Streamflow Forecasts for Hydropower Systems // *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. Pp. 1289–1306. DOI:10.1007/978-3-642-39925-1_54.

Day G.N. Extended Streamflow Forecasting Using NWSRFS // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1985. Vol. 111. No. 2. Pp. 157–170. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9496(1985)111:2(157).

Gelfan A., Moreydo V., Motovilov Y., Solomatine D.P. Long-term ensemble forecast of snowmelt inflow into the Cheboksary Reservoir under two different weather scenarios // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. No. 4. P. 2073–2089. DOI:10.5194/hess-22-2073-2018.

Mendoza P.A., Wood A.W., Clark E., Rothwell E., Clark M.P., Nijssen B., Brekke L.D., Arnold J.R. An intercomparison of approaches for improving operational seasonal streamflow forecasts // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. Vol. 21. No. 7. Pp. 3915–3935. DOI:10.5194/hess-21-3915-2017.

Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications *Earth System Science Data Discussions* // *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 82. No. January 2020. Pp. 1–50.

Prudhomme C., Zsótér E., Matthews G., Melet A., Grimaldi S., Zuo H., Hansford E., Harrigan S., Mazzetti C., Boisseson E. de, Salamon P., Garric G. Global hydrological reanalyses: The value of river discharge information for world-wide downstream applications – The example of the Global Flood Awareness System GloFAS // *Meteorological Applications*. 2024. Vol. 31. No. 2. – P. e2192. DOI:10.1002/met.2192.

Борщ С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // *Труды Гидрометцентра России*. 2017. № 366. С. 68–86.

Морейдо В.М. Оценка предсказуемости притока воды в Чебоксарское водохранилище с помощью численных экспериментов // *Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения*. 2017. С. 241–247.

Морейдо В.М., Гарцман Б.И., Соломатин Д.П., Сучилина З.А. Возможности краткосрочного прогнозирования стока малой реки с использованием методов машинного обучения // *Гидросфера. Опасные процессы и явления*. 2020. Т. 2. № 4. С. 375–390. DOI:10.34753/HS.2020.2.4.375.

Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // *Водные Ресурсы*.

2016а. Т. 43. № 3. С. 243–253. DOI:10.7868/s0321059616030111.

Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний // Водные Ресурсы. 2016б. Т. 43. № 5. С. 467–475. DOI:10.7868/s0321059616050096.

Мотовилов Ю.Г., Балыбердин В.В., Гарцман Б.И., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Соколов О.В. Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели ЕСОМАГ с использованием метеорологических прогнозов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 1. С. 78–102.

УДК 551.577.38, 556.16

**КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ УВЛАЖНЕНИЯ НА СЕВЕРЕ
ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ НА ФОНЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ:
КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ПРОЯВЛЕНИЕ В РЕЧНОМ СТОКЕ**

Попова В.В.¹, Насонова О.Н.²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия, *popova@igras.ru*

²Институт водных проблем РАН, Москва, Россия.

Аннотация. Анализируются частотно-временные характеристики годового стока и вклада климатических факторов в бассейне Северной Двины для выявления условий формирования маловодных фаз на севере европейской части России и изменения режима увлажнения в период от потепления середины 20-го века до современного глобального потепления.

Ключевые слова: Северная Двина, засухи, маловодья, температурные экстремумы, сезонные осадки, Атлантическая мультideкадная осцилляция, вейвлетные спектры

Анализ аномалий увлажнения за столетний период, от потепления середины 20-го века (ПСДВ) до современных климатических условий, представляет особый интерес с точки зрения влияния периодических колебаний температуры поверхности Северной Атлантики на фоне усиливающегося глобального потепления и увеличения частоты экстремальной летней жары и засухи в Европе (Luo et al., 2023). Изучение особенностей климатических условий гидрологических засух и их изменений на протяжении более чем 100-летнего периода позволяет восполнить недостаток эмпирических данных, необходимых для понимания причин этих явлений и управления рисками (Kreibich et al., 2022).

Для получения надежных и физической обоснованных количественных оценок в дополнение к данным гидрологических наблюдений и сеточных архивов HadCRUT5, CRUts4 используются результаты моделирования годового стока Северной Двины на LSM модели SWAP Института водных проблем РАН (Gusev et al., 2011), а также данные специализированного реанализа GSWP3-W5E5 (Mengel et al., 2021).

В продолжительных наблюдениях за стоком Северной Двины (1910–2020) зафиксированы три фазы маловодья с периодичностью 30–35 лет – 1936–1940, 1970–1975 и 2005–2015 гг. Интенсивность каждого последующего последовательно снижается, но во всех случаях летнее потепление, с повторяющимися экстремумами температуры, приходящей коротковолновой радиации (ПКР) и дефицитом осадков являются необходимым условием засухи и маловодья на севере России (рис. 1а). Наряду с факторами испарения, увлажнение определяется сезонным соотношением осадков и зависит от гидротермических условий ранней осени и поздней весны, которые оказываются разными для каждой из отмеченных фаз маловодья. Потепление середины 20-го века (ПСДВ) проявилось на севере европейской части России (ЕЧР) в повторяющихся засухах (1936, 1938, 1939, 1940) и 5-летней маловодной фазе в бассейне Северной Двины, не имеющей аналогов по продолжительности и интенсивности. Вейвлетный спектр наблюдаемого стока (рис. 1б) указывает на абсолютный максимум дисперсии в эти десятилетия. Отсутствие антропогенного регулирования и промышленной нагрузки на сток в этот период, позволяет говорить о связи гидроклиматического режима 1920–1940-х гг. на севере ЕЧР с внутренней климатической изменчивостью, в частности с переходом АМО в положительную фазу и началом ПСДВ. Крупномасштабные факторы этого явления связаны не только с теплой фазой АМО, но и с меридиональной неоднородностью аномалий температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике, способствующих ослаблению зонального переноса и обширного атмосферного блокирования на северо-западе Евразии в летний сезон (Popova et al., 2023).

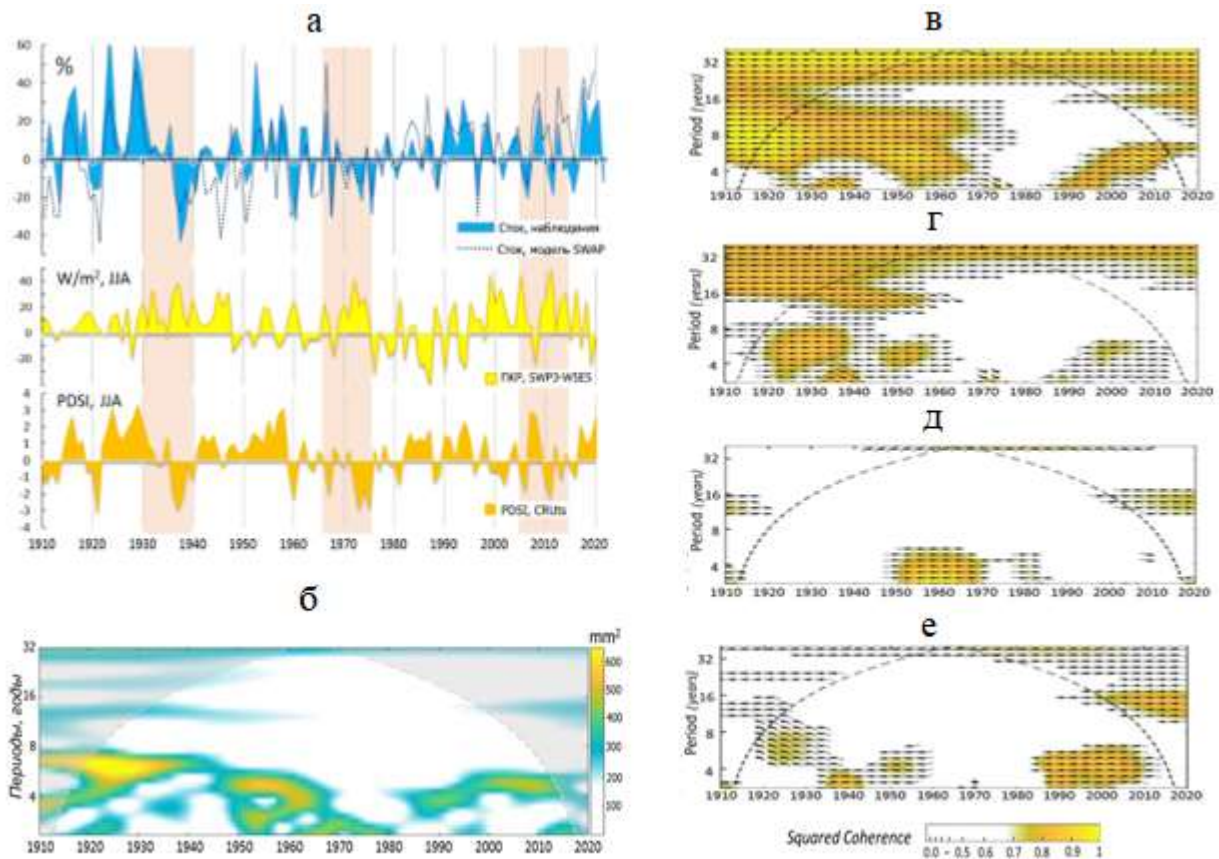


Рис. 1. Аномалии годового стока Северной Двины, приходящей коротковолновой радиации, ПКР, и индекса засухи Палмера, PDSI, июнь-июль (а), вейвлетный спектр изменчивости стока (б) и когерентность стока с аномалиями осадков за май-октябрь (в), июнь-август (г), ноябрь-апрель (д), и приходящей коротковолновой радиацией за июнь-август (е)

Климатический режим современного потепления и снижения годового стока Северной Двины в 2000–2010-е гг. на фоне выраженного увеличения его изменчивости после периода 1970–1980 гг., о чем свидетельствует рост спектральной плотности в области 4-7-летних периодичностей (рис. 1б), аналогичен аномалиям периода ПДСВ. В обоих случаях «драйвером» летнего потепления являются аномалии ТПО Северной Атлантики и положительная фаза АМО и АМО-подобных режимов (Porova et al., 2023), проявляющиеся в увеличении фоновых значений приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) во все сезоны.

В 2005–2014 гг. сезонные значения ПТВ превышали соответствующие значения 1930-х годов, для ранней осени и холодного периода (ХП) разница наиболее выражена – 0.9–1.0°C. Другой особенностью современного климатического режима стало значительное увеличение фоновых и особенно экстремальных значений ПКР (GSWP3-W5E5) по сравнению с 1931–1940 гг. (рис. 1а). В то же время, усиление факторов, способствующих росту испарения, в 2000-х и 2010-х гг. не приводили к повторяющимся сильным засухам и значительному сокращению годового речного стока из-за увеличения количества осадков, главным образом в ХП. Повышение температуры воздуха в ХП в 2005–2014 гг. на 0.9 (0.7)°C по сравнению с 1931–1940 годами сопровождалось увеличением количества осадков на 27 (47) мм, или на 13 (19)%, согласно HadCRUT.5, CRUTs.4 (GSWP3-W5E5). Оценки связи осадков в бассейне Северной Двины с ростом ПТВ в ХП, а за год в целом в 1910–2020 гг., позволяют нам отнести этот эффект к последствиям антропогенного глобального потепления. Регрессионная зависимость объясняет увеличение осадков в 2000–2010-х гг. на 20–22% по сравнению с 1930–1940 гг., что превышает показатели, соответствующие соотношению Клаузиуса–Клапейрона, 6–8% на 1°C.

Последнее, вероятно, связано с вкладом крупномасштабной атмосферной циркуляции, в частности, с усилением западного переноса в регионе Северной Двины с начала 1970-х гг. Ранее (Попова, 2023) показано, что твердые осадки и годовой сток в бассейне Северной Двины контролируются модами атмосферной циркуляции (в терминах Northern Hemisphere Teleconnection Patterns, Barnston and Livesey, 1987), контролирующими усиление западного переноса (NAO и EA) и его ослабление (Scand и PNA). Вариациями индексов Scand и PNA объясняется увеличение годового стока Северной Двины с середины 1970-х гг., а также 5-6 и 35-летнюю периодичности его колебаний в 1951–2018 гг. (Попова, 2023).

Засушливый период начала 1970-х и 4-летняя фаза маловодья в бассейне Северной Двины показывает наиболее близкое сходство с экстремальной засухой 1930-х гг. с точки зрения интенсивности, продолжительности и воздействия на речной сток. В отличие от 1930-х, а также 2000-х и 2010-х гг., в этот период летние температурные экстремумы "возникали" на фоне холодного и сухого климата с наиболее высокой за рассмотренный период изменчивостью ПТВ и осадков, особенно в ХП. Экстремальная жара и засухи в 1972–1974 гг. наблюдались на фоне частых холодных летне-осенних сезонов, тем не менее, в 1972–1975 гг. летний PDSI, усредненный по бассейну реки, показывает значения, близкие к периоду 1936–1940-х гг. (рис. 1а). Отличительной особенностью этого периода стало изменение структуры изменчивости стока в сторону высокочастотной составляющей и резкое сокращение дисперсии (рис. 1б). Особенности этого климатического режима связаны с холодной Атлантикой и отрицательной фазой АМО, минимум которой пришелся на середину 1970-х гг. (Pорова et al., 2023). Как показано в (Ghosh и др., 2019) линейная реакция летнего климата в Центральной и Восточной Европе на аномалии ТПО в Атлантике зависит от их локализации. События экстремальной жары и засухи на ВЕР, включая его северную часть и бассейн Северной Двины, в начале 1970-х гг. в отрицательной фазе АМО, следует рассматривать как нарушение линейности из-за меридиональной неоднородности в распределении аномалий ТПО (Pорова et al., 2023). Пока нет достаточных данных для вывода о закономерностях этого явления и его повторения в будущем, тем не менее, экстремальную жару и гидрологическую засуху на севере ЕЧР в начале 1970-х гг., в условиях холодной Атлантики, можно рассматривать как вероятный сценарий замедления и коллапса Атлантической меридиональной опрокидывающей циркуляции (АМОС), влияние которой на европейский климат обсуждается в связи с полученными модельными прогнозами (Caesar et al., 2018).

Анализ спектров вейвлетной когерентности, показывает, что основная часть дисперсии годового стока связана с колебаниями осадков теплого периода (ТП), и в первую очередь, летних осадков (рис. 1 в, г). Это относится к максимумам 1920–1940-х годов в диапазоне 5–7-летних периодов и 1950–1960-х гг. в диапазоне 4–5-летних периодов. Максимальные значения когерентности в высокочастотном диапазоне приходятся на 1930–1940-е и 1990–2000-е гг. Полоса максимума, выше 0.9, в низкочастотной области указывает на тесную связь аномалий стока с вариациями осадков ТП на периодах 30–34 года. Хотя на их долю приходится небольшая часть дисперсии, особый интерес к ним связан с сохранением соответствующих направленных тенденций и повторяемостью маловодных фаз. В отличие от ТП, вклад осадков ХП в изменчивость годового стока (рис. 1д) проявляется в ограниченном диапазоне 2–5-летних периодичностей и кратковременно, с 1950-х до середины 1980-х гг. Период 1950–1970-х гг. отмечен максимумом когерентности, превышающим 0.9 в полосе высокочастотных колебаний от 2 до 4 лет. В 1980-х гг. вклад осадков ХП проявлялся в том же диапазоне частот, но значительно слабее. В современных климатических условиях, начиная с конца 1970-х годов, роль изменчивости летних осадков ослабевает. Наиболее высокие значения когерентности, до 0.8–0.9, с изменчивостью речного стока с 1980-х гг., выявлены для ПКР в диапазоне периодичности 2–7 лет (рис. 1е).

Заключение. Три фазы маловодья с периодичностью около 30–34 лет, зафиксированные в межгодовых колебаниях стока Северной Двины в 1910–2020 гг., и проявляющихся в вейвлетных спектрах, указывают на их связь с жаркими и засушливыми условиями на ЕЧР в 1935–1940, 1970–1975 и 2005–2015 гг. Хотя во всех случаях летнее

потепление и повторяющаяся экстремальная жара, являются необходимым фактором, каждая из фаз маловодья характеризуется особым режимом фоновых климатических условий. Циклические изменения ТПО Северной Атлантики, описываемые индексом АМО, являются основным крупномасштабным фактором повторяющихся явлений экстремальной летней жары и засухи. Теплая фаза АМО в наибольшей степени способствовала экстремальным засухам и беспрецедентному маловодию Северной Двины в 1930-х гг., во время потепления в начале ПСДВ, а также существенному падению стока в 2000-х и 2010-х гг.

В отличие от 1930-х годов, снижение стока 2000-х и 2010-х гг. не достигло полноценной фазы маловодья, несмотря на значительное повышение фоновой температуры и коротковолновой нисходящей радиации в летне-осенний период. В современных климатических условиях усиление влияния факторов испарения компенсировано ростом осадков, главным образом в холодный период, которое может быть отнесено к воздействию глобального потепления. Экстремальная жара, засухи и 4-летняя фаза маловодья на Северной Двине в начале 1970-х гг., "возникшие" на фоне холодной Северной Атлантики и отрицательной фазы АМО, могут рассматриваться как нарушение линейного эффекта из-за меридиональной неоднородности, в результате которого в режиме увлажнения на ЕЧР характерные для АМО 60–70-летние периодичности трансформировались в 30–34-летние.

Список литературы:

- Попова В.В. Современные тренды осадков и атмосферной циркуляции в речных бассейнах европейской части России // Изв. РАН. Сер. географ. 2023. № 87(1). С. 60–76.
- Caesar L., Rahmstorf S., Robinson A., et al. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation // Nature. 2018. Iss. 556, P. 91–196. DOI:10.1038/s41586-018-0006-5
- Barnston A., Livesey R. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Monthly Weather Review. 1987. Iss. 115. P. 1083–1126.
- Ghosh R., Müller W., Eichhorn A., et al. Atmospheric pathway between Atlantic multidecadal variability and European summer temperature in the atmospheric general circulation model ECHAM6 // Climate Dynamics. 2019. Iss. 53. P. 209–224. DOI:10.1007/s00382-018-4578-4
- Gusev, E.M., Nasonova, O.N., Dzhogan, et al. Northern Dvina runoff simulation using land-surface model SWAP and global databases // Water Resour. 2011. Vol. 38. Iss. 4. P. 470–483
- Kreibich H., Van Loon A., Schröter K., et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management // Nature. 2022. Iss. 608. P. 80–86. DOI:10.1038/s41586-022-04917-5.
- Luo, B., Luo, D., Zhuo, et al. Increased summer European heatwaves in recent decades: Contributions from greenhouse gases-induced warming and Atlantic Multidecadal Oscillation-like variations // Earth's Future. 2023. Iss. 11. P. 2023EF003701. DOI:10.1029/2023EF0037
- Mengel M., Treu S., Lange S., et al. ATTRICI v1.1 – counterfactual climate for impact attribution // Geoscientific Model Development. 2021. Iss. 14. P. 5269–5284. DOI:10.5194/gmd-14-5269-2021
- Popova V., Aldonina T., Bokuchava D. Manifestation of the Early 20th Century Warming in the East-European Plain: Atmospheric Circulation Anomalies and Its Connection to the North Atlantic SST and Sea Ice Variability // Atmosphere. 2023. Iss. 14. P. 428. DOI:10.3390/atmos14030428

УДК 556.16:911.52

**СЕЗОННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА В УСЛОВИЯХ
ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ЭВОЛЮЦИИ ГОРОДСКИХ ЛАНДШАФТОВ
(НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕГО НОВГОРОДА)**

Ясинский С.В.¹, Сидорова М.В.¹, Хохлов Д.Н.², Соболев С.В.², Одеркова А.П.¹, Нарыков А.Н.¹
sidorova@igras.ru

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний
Новгород, Россия

Аннотация. На основе анализа климатических рядов 1886–2023 гг. и реконструкции ландшафтной структуры для трех исторических этапов выполнена количественная оценка сезонного поверхностного стока с территории Нижнего Новгорода. Расчет осуществлен по сезонным суммам осадков с использованием ландшафтно-специфичных коэффициентов стока и коэффициентов редукции, с учетом вклада овражно-балочной сети. Показано увеличение среднегодового стока с 178 до 214 мм и доминирующая роль урбанизации в росте летне-осеннего компонента.

Ключевые слова: урбанизация, поверхностный сток, сезонная структура, изменение климата, малые реки, Нижний Новгород

Исследование выполнено для территории Нижнего Новгорода в пределах административных границ соответствующих периодов. Рассмотрены временные срезы: 1886–1905 гг. (условный период конца XIX – начала XX века), 1955–1974 гг., 2004–2023 гг., а также прогнозные периоды XXI века. Такой выбор соответствует 30-летним климатическим интервалам и обеспечивает сопоставимость результатов.

Климатический анализ основан на данных метеостанции «Нижний Новгород» за 1886–2023 гг. Для выявления статистически значимых трендов температуры и осадков применен модифицированный тест Манна–Кендалла. Разрывы однородности выявлялись по критериям Петтитта и Колмогорова–Смирнова. За анализируемый период средняя годовая температура увеличилась с 3.6 до 5.3°C. После 1976 г. среднегодовые суммы осадков возросли с 525 до 672 мм, что свидетельствует о переходе к более влажному режиму (Булыгина и др., 2014).

Реконструкция ландшафтной структуры выполнена по карте 1893 г., снимкам CORONA 1966–1967 гг. и современным космическим изображениям. Площадь города увеличилась с 32 до 470 км². Существенно возросли площади многоэтажной застройки (с 38.9 до 77.8 км²) и промышленных территорий (с 33.2 до 60.7 км²), что привело к росту доли непроницаемых покрытий.

Расчет сезонного поверхностного стока проводился по формуле:

$$H = h C \eta,$$

где h – сезонная сумма осадков, C – коэффициент стока для соответствующего типа поверхности, η – коэффициент редукции, учитывающий потери при добегании стока до русловой сети.

При определении коэффициентов стока учитывались работы (Коронкевич, 1990; Коронкевич, Мельник, 2014; Ясинский и др., 2023). Для естественных территорий в зимне-весенний период принимались $C = 0.1$ и $\eta = 0.75$; для сельскохозяйственных угодий $C = 0.47$ и $\eta = 0.75$; для урбанизированных слабопроницаемых поверхностей $C = 0.5–0.6$ ($\eta = 0.8–0.9$); для непроницаемых покрытий $C = 0.6–0.8$ ($\eta = 0.8–0.9$). Отдельно рассчитывался сток с площади овражно-балочной сети ($C = 0.8$) с использованием коэффициента перераспределения снегозапасов $\alpha = 1.5$. Итоговый слой стока определялся как сумма поверхностного и сетевого компонентов (рис. 1).

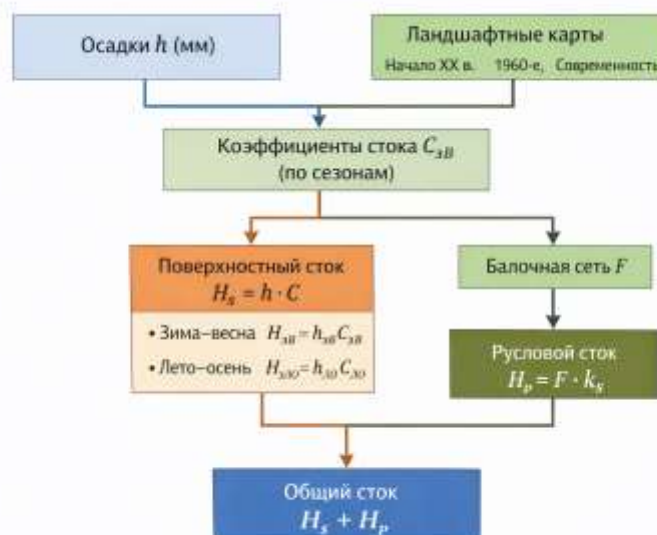


Рис. 1. Схема расчета сезонного поверхностного стока

Средневзвешенные значения стока приведены в табл. 1. За столетний период среднегодовой сток увеличился с 178 до 214 мм. Наиболее выраженные изменения характерны для летне-осеннего сезона. При совместном влиянии изменения осадков и структуры ландшафтов рост летне-осеннего стока составил 88 %, тогда как зимне-весеннего – 34 %. Раздельные расчеты показали, что изменение структуры ландшафтов при фиксированных осадках увеличивает летне-осенний сток на 57–59 %, тогда как изменение осадков при неизменной структуре – на 18–20 %. Таким образом, урбанизация выступает доминирующим фактором трансформации летнего поверхностного стока.

Таблица 1. Средневзвешенный поверхностный сток с территории города, мм.

Период	Зима-весна	Лето-осень	Год
1886–1905	89	89	178
1955–1974	92	72	164
2004–2023	109	105	214

Работа выполнена в рамках темы FMWS-2026-0003 "Географо-гидрологическая оценка изменений водных ресурсов в прошлом, настоящем и будущем в различных природных и хозяйственных условиях", картографические работы, дешифрирование космических снимков и архивной аэрофотосъемки проводились в рамках темы Государственного задания FMWS-2024-0009.

Список литературы:

- Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Специализированные массивы данных для климатических исследований // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2014. № 177. С. 136–148.
- Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 204 с.
- Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Изменение стока на территории города Москвы в результате ландшафтных преобразований // Водное хозяйство России. 2014. № 6. С. 57–68.
- Ясинский С.В. и др. Формирование стока малых рек в крупном городе бассейна Волги // Водное хозяйство России. 2023. № 1. С. 5–19.

УДК 556

ВОДНЫЙ И ТВЕРДЫЙ СТОК АРКТИЧЕСКИХ РЕК В УСЛОВИЯХ ТЕКУЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Шмакова М.В.

ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, СПб, Россия, *m-shmakova@yandex.ru*

Аннотация. Текущие климатические изменения совместно с социально-экономической деятельностью неоднозначно влияют на условия формирования водного и твердого стока на водосборе. Для больших рек, расположенных в разных физико-географических и климатических зонах, эта неоднозначность усугубляется региональными особенностями частных водосборных территорий.

Ключевые слова: расход воды, расход наносов, изменение климата, Арктические реки, водосбор

Арктический регион Российской Федерации является одним из ключевых элементов ресурсно-энергетической базы нашей страны. Последний климатический период характеризуется значительным повышением температуры воздуха Арктической зоны в сравнении с общими тенденциями, наблюдаемыми в целом по территории России. При этом изменение климата приводит к изменению водности рек, ее перераспределению в течение года. На водосборных бассейнах рек вечной мерзлоты принципиально меняются и условия формирования водного и твердого стока. Так, повышение температуры воздуха приводит к более активному оттаиванию мерзлых пород, слагающих русла водотоков и почвенного слоя водосборных территорий. Все это приводит к усилению процессов почвенной эрозии на водосборе, активизации процессов русловых деформаций и, как следствие, увеличению расхода наносов и мутности воды рек (Lu et al., 2013; Mernild et al., 2006).

Для семи водотоков бассейна Северного Ледовитого океана Азиатской части Российской Федерации (расчетные створы и их характеристики приведены в табл. 1) были рассчитаны скорости изменения водного v_Q , л/(с·км²·год) и твердого стока на основании линейных трендов периода 1961–2020 гг. Также были рассчитаны отклонения средних значений этих величин второго климатического периода (Новый двухуровневый подход...; WMO Guidelines, 2023) (1991–2020 гг.) по отношению к первому периоду (1961–1990 гг.), δ , %. Для того, чтобы проанализировать пространственные закономерности распределения исследуемых величин, рассматривались удельные характеристики стока – среднегодовой модуль стока воды и модуль годового твердого стока. Результаты показали зависимость скорости изменения среднегодового модуля стока воды от долготы и относительных отклонений среднегодовых расходов воды от широты исследуемых створов (рис. 1). То есть, согласно расчетам, значения скорости изменения модуля годового стока воды и относительные отклонения среднегодовых расходов воды увеличиваются с запада на восток, также отклонения увеличиваются и с юга на север.

Таблица 1. Основные характеристики расчетных створов.

Расчетный створ	Площадь водосбора, км ²	Координаты, °с.ш.	Координаты, °в.д.
Енисей – г. Игарка	2440000	86.5	67.5
Обь – г. Салехард	2950000	66.6	66.5
Лена – с. Кюсюр	2430000	127.3	70.77
Оленек – 7.5 км ниже устья р. Буур (Пур)	198000	123.65	71.85
Яна – п.ст. Юбилейная	224000	136.15	70.75
Колыма – г. Среднеколымск	361000	153.75	67.5
Индигирка – гм.ст. Воронцово	305000	147.53	69.57

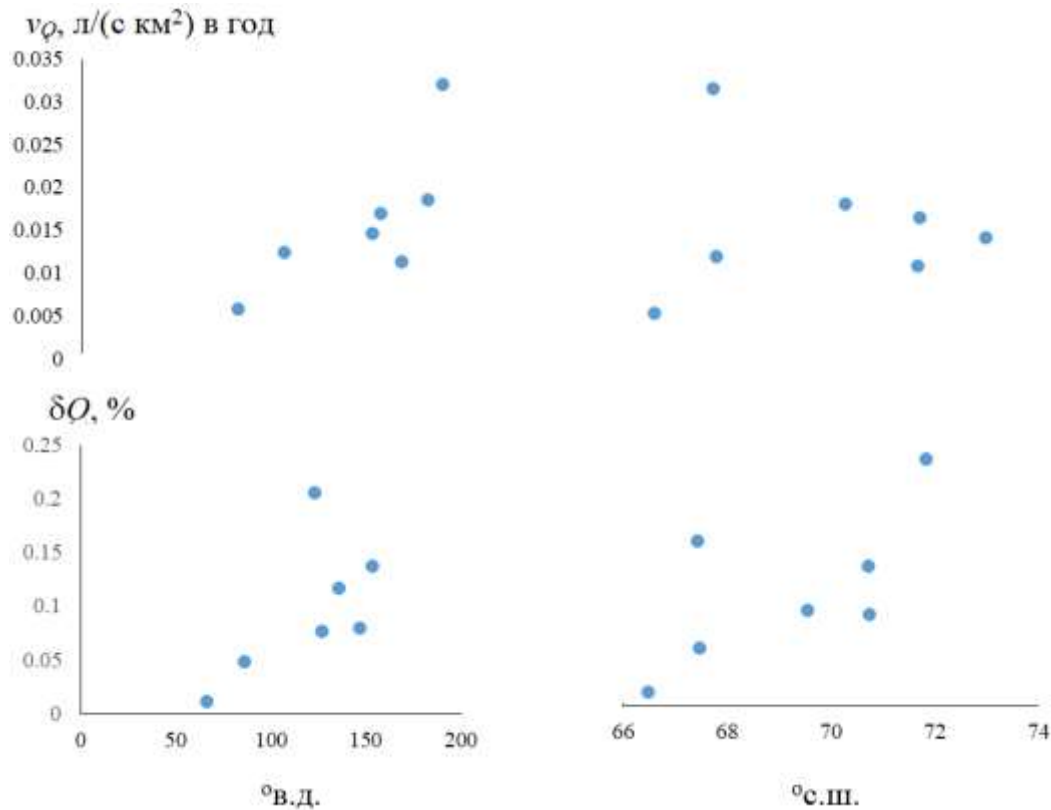


Рис. 1. Зависимость скорости изменения среднегодового модуля стока воды от долготы и относительных отклонений среднегодовых расходов воды от широты исследуемых створов

При этом, для твердого стока выраженной зависимости от расположения расчетного створа не наблюдается. Последнее объясняется существенным влиянием на формирование и состав твердого стока антропогенной деятельности на водосборе. Для реки Обь – это изменение площади сельскохозяйственных угодий, а для некоторых исследуемых рек – уменьшение горнодобывающей активности на водосборе. Зависимости скорости изменения и отклонений метеорологических величин (среднегодовой температуры воздуха и годовых слоев осадков) от географического расположения метеостанций также не выражены. Принимая во внимание наличие зависимостей для стока, можно отметить, что последнее демонстрирует нелинейный вклад метеорологических величин в формирование стока на водосборе.

Моделирование стока исследуемых рек в соответствии с социально-экономическими сценариями серии RCP (Schwalm et al., 2020) и разработанными на их основе сценариями изменения климата показали общее уменьшение водности исследуемых рек. Так, например, для реки Обь в створе Салехард при численной реализации наиболее неблагоприятного сценария (RCP 8.5) на конец 2100 года среднегодовой расход воды уменьшится на 13%, а годовой твердый сток уменьшится на 54 % (Shmakova, 2025). На рис. 2 в качестве примера приведены кривые распределения среднегодовых расходов воды и расходов наносов, построенные по данным наблюдений и по результатам численных экспериментов для климатических сценариев RCP 2.6 и 8.5.

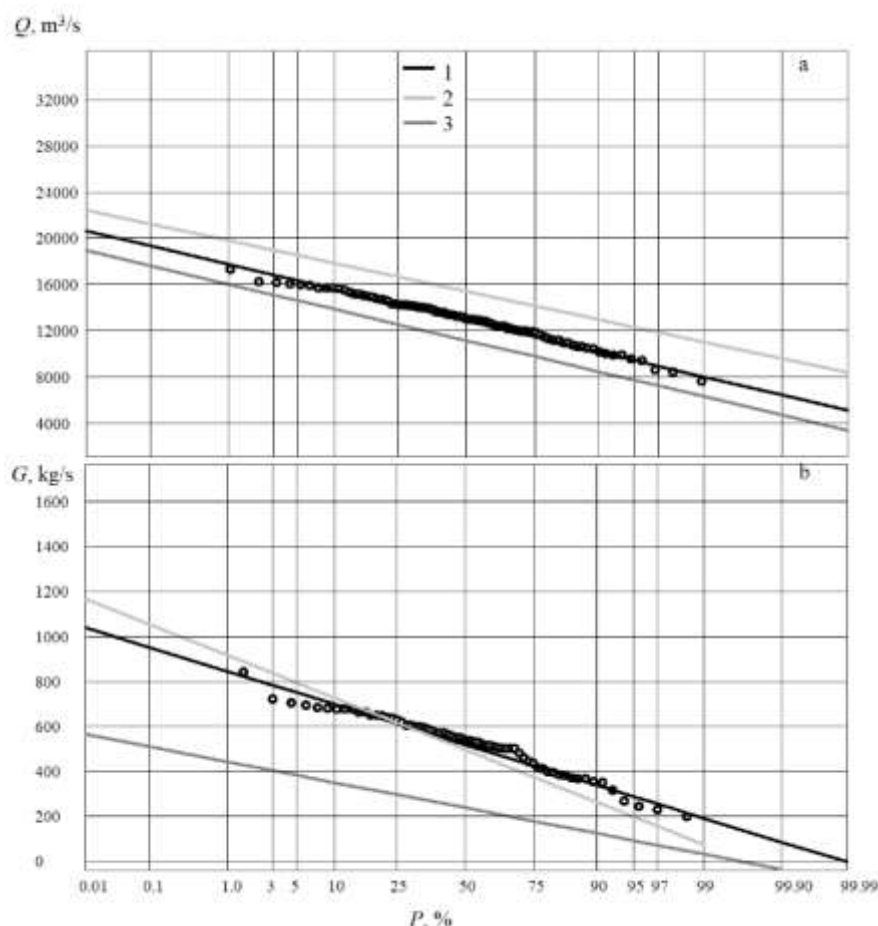


Рис. 2. Кривые распределения среднегодовых расходов воды (а) и наносов (б), р. Обь – г. Салехард. 1 – наблюдаемые данные, 1991–2020 гг.; 2 – RCP 2.6, 2091–2100 гг.; 3 – RCP 8.5, 2091–2100 гг.

Список литературы:

- Lu X.X., Ran L.S., Liu S., Jiang T., Zhang S.R., Wang J.J. Sediment loads response to climate change: A preliminary study of eight large Chinese rivers // *International Journal of Sediment Research*. 2013. Vol. 28. No. 1. Pp. 1–14.
- Mernild S. H., Sigsgaard C., Hasholt B., Rasch M., Hansen B. U., Stjernholm M. & Petersen D. Climate, water discharge and suspended sediment load in Zackenberg drainage basin, NE Greenland 1995–2003 // *Meddelelser om Gronland, GEUS Copenhagen, Denmark*. 2006.
- Новый двухуровневый подход к «климатическим нормам». Гидрометцентр России. Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11151-03062015-1-r>. (дата обращения 19.01.2026)
- Shmakova M. The Ob river water and sediment runoff under changing climate conditions // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025. Vol. 25. No. 5. P. ES5007. DOI: 10.2205/2025es001005
- Schwalm C.R., Glendon S., Duffy Ph.B. RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117 (33). P. 19656–19657. DOI: 10.1073/pnas.2007117117
- WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. World Meteorological Organization. WMO-No 1205. 2023. 18 p.

СЕКЦИЯ 5. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ

РОЛЬ ИСПАРЕНИЯ В ВОДНОМ БАЛАНСЕ ОЗЕРА ЧАД: ОЦЕНКА ПОТЕРЬ И МЕТОДЫ ИХ СНИЖЕНИЯ

Аллахиссем Серж

Национальный исследовательский Томский государственный университет

sallahissem@mail.ru, sergeallahissem@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается роль испарения в водном балансе озера Чад в условиях засушливого климата. Проведена оценка потерь воды на испарение по данным метеорологических наблюдений и расчетным методикам водного баланса. Показано влияние сезонной и межгодовой изменчивости климата, а также антропогенной нагрузки на величину потерь испарения. Рассмотрены возможные инженерные и управленческие меры по снижению испарения и стабилизации уровня озера.

Ключевые слова: озеро Чад; водный баланс; испарение; аридные регионы; климатические изменения; антропогенное воздействие

Введение

Озеро Чад — жизненно важный водный ресурс для ~13 млн человек в Сахеле, используемый для питья, ирригации, рыболовства и животноводства (Coe, Foley, 2001). Со второй половины XX века наблюдается его резкое сокращение: с ~25 000 км² в 1960-х гг. до ~1350 км² в 2005 г. (Leblanc et al., 2011). В аридном климате с высокой испаряемостью водный баланс озера крайне чувствителен к потерям на испарение, что делает изучение этого процесса ключевым для оценки устойчивости экосистемы и планирования ее адаптации к изменениям климата (Coe, Foley, 2001; Leblanc et al., 2011).

Водный баланс и испарение

Озеро находится в центре обширного бессточного бассейна (~2,5×10⁶ км²), где 80–96% притока обеспечивают реки Шари-Логон (Bouchez et al., 2016; Crétaux et al., 2013; Vallet-Coulomb et al., 2006). Баланс описывается уравнением:

$$Q_{in} + P = E + T + I + Q_{out} + \Delta S, \quad (1)$$

где E — испарение с водной поверхности, T — транспирация растительности, I — инфильтрация в подземные горизонты (Bouchez et al., 2016). Для всей системы (озеро, болота, архипелаги) эвапотранспирация ($E+T$) — доминирующая статья расхода, хотя в южном плесе (SPLC) существенную роль играет поверхностный отток (Bouchez et al., 2016; Crétaux et al., 2013).

Количественная оценка испарения

Исследования (1955–2011 гг.) показывают, что суммарные потери ($E+T+I$) составляют 2070±100 мм/год в южном плесе и 2270±100 мм/год — в северном, при этом инфильтрация оценивается лишь в 100–300 мм/год (Bouchez et al., 2016). Согласно байесовской оценке, инфильтрация составляет ~5% от общих потерь, а остальные ~95% приходятся на испарение и транспирацию (Carmouze, 1969). Таким образом, эвапотранспирация является главным компонентом расхода воды в озере Чад (Bouchez et al., 2016; Crétaux et al., 2013; Carmouze, 1969). В южном плесе большая часть потерь (~84%) компенсируется поверхностным стоком в другие части озера, но в масштабе всего бассейна вода в конечном итоге теряется через испарение (Bouchez et al., 2016; Crétaux et al., 2013).

Для анализа были использованы суточные метеорологические данные (температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра) со станций в г. Нджамене и г. Боле за период 2011–2022 гг., полученные с портала «Климат и Погода» (Сайт «Погода и климат», б.г.).

Помесячные величины испарения с поверхности воды двух озер были рассчитаны нами по формуле Н.Н. Иванова (Иванов, 1957):

$$E = 0,0018 (25 + \theta_2)^2 (100 - r^2), \quad (2)$$

где E – слой испарившейся воды, мм/мес;

θ_2 – средняя месячная температура воздуха на высоте 2 м;

r^2 – средняя месячная относительная влажность воздуха на высоте 2 м.

Таблица 1. Расчет испарения с поверхности воды оз. Чад по методу Н.Н. Иванова за период с 2011 по 2022 гг

Е, мм	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Е, мм за год
2011	306	414	476	479	401	243	177	108	125	256	356	336	3678
2012	328	421	453	497	353	235	125	80.0	120	211	335	324	3482
2013	334	398	485	476	368	270	170	86.5	145	289	376	329	3728
2014	270	383	430	404	365	328	200	97.1	139	239	383	318	3556
2015	317	427	479	503	456	313	169	108	141	247	375	294	3829
2016	322	386	480	492	384	209	116	79.0	114	274	377	339	3573
2017	300	431	472	445	382	233	129	77.0	122	281	353	288	3514
2018	285	387	485	492	360	253	111	74.8	102	221	349	237	3357
2019	300	363	476	490	364	207	127	66.7	119	121	300	307	3241
2020	295	360	454	501	386	268	112	81.7	81,2	228	320	308	3396
2021	344	360	467	500	431	270	153	103	143	336	412	363	3883
2022	328	383	476	424	368	276	127	70.8	80,0	216	338	299	3386

Факторы и методы оценки испарения

Высокая потенциальная испаряемость (2000–2300 мм/год) в Сахеле обусловлена температурой, дефицитом влажности, ветром и солнечной радиацией (Shuqin et al., 2014; Wang et al., 2023; Zhou et al., 2021). В аридных зонах доля потерь воды на испарение может превышать 40% от притока (Wang et al., 2023). Для оценки применяют комплекс методов: гидрологическое и изотопно-химическое бюджетирование для разделения вкладов E , T и I (Bouchez et al., 2016; Carmouze, 1969; Neukum et al., 2023; Poulin et al., 2019; Vallet-Coulomb et al., 2006); дистанционное зондирование для отслеживания изменений уровня и площади (Crétau et al., 2013); а также концептуальное моделирование (Craig, Gordon, 1965; Poulin et al., 2019).

Методы снижения потерь на испарение

Инженерные методы на акватории. Частичное покрытие водной поверхности, особенно мелководий, плавающими фотоэлектрическими системами (FPVS) может значительно сократить испарение (как показано для озера Нассер) и одновременно производить электроэнергию (El-Nashar, Elyamany, 2018; Santana et al., 2020). Альтернативой, менее вредной для экосистем, являются плавающие решетчатые конструкции, снижающие испарение на 40–60% за счет уменьшения скорости ветра (Farid et al., 2013).

Управление морфометрией. Углубление дна для сокращения площади зеркала при сохранении объема теоретически возможно, но требует тщательной оценки из-за риска

нарушения экологических процессов и внутреннего водообмена (Crétaux et al., 2013; El-Nashar, Elyamany, 2018).

Управление водозабором. Ключевые меры включают оптимизацию орошения (капельные системы, ночной полив) и рациональное землепользование для поддержания речного стока, поскольку антропогенная деятельность стала основной причиной его сокращения (~73% потерь) (Bader et al., 2011; Shiklomanov, Lammers, 2009).

Заключение

Испарение (эвапотранспирация) формирует 90–95% потерь воды в озере Чад, определяя его уязвимость (Bouchez et al., 2016; Carmouze, 1969; Crétaux et al., 2013; Leblanc et al., 2011). Современные методы позволяют количественно оценивать эти потери. Для устойчивого управления необходим комплексный подход, сочетающий локализованные инженерные решения (частичное покрытие FPVS – Floating Photovoltaic Systems, решетки) с бассейновыми мерами (оптимизация водопользования). Перспективные направления исследований включают детальное моделирование сценариев, пространственный анализ для внедрения технологий и интеграцию мониторинга для разработки адаптивной стратегии в условиях изменения климата (Bouchez et al., 2016; El-Nashar, Elyamany, 2018; Farid et al., 2013; Neukum et al., 2023; Santana et al., 2020; Vallet-Coulomb et al., 2006; Wang et al., 2023; Zhang et al., 2019).

Список литературы:

- Иванов Н.Н. Мировая карта испаряемости. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. 38 с.
- Сайт «Погода и климат» <http://www.pogodaiklimat.ru/?ysclid=mbj4flpzui561586172>
- Bader J.-C., Lemoalle J., Leblanc M. Modèle hydrologique du lac Tchad // Hydrological Sciences Journal. 2011. Vol. 56. No. 3. P. 411–425.
- Bouchez C., Gonçalves J., Deschamps P., et al. Hydrological, chemical, and isotopic budgets of Lake Chad: a quantitative assessment of evaporation, transpiration and infiltration fluxes // Hydrology and Earth System Sciences. 2016. Vol. 20. P. 1599–1619.
- Carmouze J.-P. Le lac Tchad: étude physico-chimique et bilan des sels // Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie. 1969. Vol. 6. No. 3. P. 3–43.
- Coe M. T., Foley J. A. Human and natural impacts on the water resources of the Lake Chad basin // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2001. Vol. 106. No. D4. P. 3349–3356.
- Craig H., Gordon L. I. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere // Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures. – Pisa: Consiglio Nazionale delle Ricerche, 1965. P. 9–130.
- El-Nashar W. Y., Elyamany A. H. Water and energy co-benefits of floating photovoltaic systems on Lake Nasser, Egypt // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 639. P. 142–152.
- Farid M., et al. Mitigation of evaporation from water surfaces by floating covers: laboratory experiments and field applications // Journal of Hydrology. 2013. Vol. 486. P. 196–205.
- J. Crétaux, et al. Water balance of the southern pool of Lake Chad inferred from satellite observations and hydrological modeling // Hydrology and Earth System Sciences. 2013. Vol. 17. P. 3357–3373.
- Leblanc M., Lemoalle J., Bader J.-C., et al. Reconstruction of 50 years of past hydrology in the Lake Chad basin // Hydrology and Earth System Sciences. 2011. Vol. 15. P. 3065–3088.
- Lemoalle J., Magrin G. Le développement du lac Tchad: situation actuelle et futurs possibles. – Marseille: IRD Éditions, 2014. 320 p.

- Neukum C., Morales-Santos A., Ronelngar M., et al. Modelling groundwater recharge, actual evaporation, and transpiration in semi-arid sites of the Lake Chad basin: the role of soil and vegetation in groundwater recharge // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2023. Vol. 27. P. 4205–4224.
- Olowoyeye O. S., Kanwar R. Water and Food Sustainability in the Riparian Countries of Lake Chad in Africa // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 13. 10365.
- Poulin C., Hamelin B., Vallet-Coulomb C., et al. Unraveling the hydrological budget of isolated and seasonally contrasted subtropical lakes // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019. Vol. 23. P. 1639–1663.
- Santana M. V. E., et al. Reducing evaporation from water reservoirs using floating photovoltaic solar panels: case study of a large reservoir in a semi-arid region // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 1075–1083.
- Shiklomanov I. A., Lammers R. B. River discharge and environmental change: facts and speculations // *Hydrological Processes*. 2009. Vol. 23. No. 3. P. 323–334.
- Shuqin L., et al. Evaporation loss from large reservoirs in arid and semi-arid regions // *Water Resources Management*. 2014. Vol. 28. P. 401–416.
- Vallet-Coulomb C., Gasse F., Robison L., et al. Lake level and climate changes in the Chad Basin // *Quaternary Science Reviews*. 2006. Vol. 25. P. 3072–3084.
- Wang Y., Du R., Cao X., et al. Evaporation dominates the loss of plateau lake in Southwest China using water isotope balance assessment // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 858. 159841.
- Zhang C., et al. Global Lake evaporation accelerated by changes in surface energy fluxes and morphology // *Nature Communications*. 2019. Vol. 10. 1645.
- Zhou Y., et al. A global assessment of climate-driven lake evaporation change // *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11. P. 55–60.

УДК 628.171

ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ И ЭКОНОМИКИ В РОССИИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Балонишникова Ж.А., Еремеева А.О.

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия,
jeannabalonishnikova@gmail.com, eranol@mail.ru

Аннотация. Для повышения эффективности использования воды выполнены исследования по оценке водобеспеченности за многолетний период с учетом качества водных ресурсов. Показана динамика использования воды в России. Представлены современные данные по водобеспеченности всех субъектов и Федеральных округов РФ. Выявлены тенденции показателей качества воды в бассейнах Дона и Нижней Волги с целью разработки мер по увеличению водобеспеченности.

Ключевые слова: использование воды, водобеспеченность, качество вод

Климатические изменения и те последствия, к которым они приводят в социально-экономической сфере, требуют возрастающих усилий по разработке и реализации адаптационных мероприятий в водохозяйственном секторе экономики. Оценка последствий климатических изменений – это основа при разработке региональных и государственных стратегий адаптации к климатическим изменениям. Однако в силу большой неопределенности климатических изменений адаптация к последствиям изменения климата в области водных ресурсов и их использования является сложной задачей. С этой точки зрения анализ и оценка тенденций использования воды на различные хозяйственные нужды представляется весьма актуальной задачей, поскольку такие оценки позволяют спрогнозировать водопотребление и разработать соответствующие меры для повышения водобеспеченности в регионах с ограниченными водными ресурсами. При этом важно понимать, что доступность и использование водных ресурсов следует рассматривать с точки зрения не только их количества, но и качества. Этому вопросу в настоящее время уделяется большое внимание, т.к. одной из задач устойчивого развития является достижение к 2030 г. поставленной ООН Цели по доступности водных ресурсов соответствующего качества (Организация..., 2018).

Принимая во внимание значимость Цели 6 Повестки ООН 2030 – «обеспечение доступности водных ресурсов и их соответствующего качества для каждого человека» и призыв ведущими международными организациями к достижению этой цели, в Государственном гидрологическом институте в последние годы выполняются исследования по оценке водобеспеченности и использованию водных ресурсов не только с точки зрения их количества, но и их качества. Особенно, эти исследования актуальны для южных вододефицитных районов страны. На примере субъектов бассейнов Дона и Нижней Волги выполнена оценка качества водных ресурсов, улучшение которых способствовало бы повышению количества и доступности используемой воды для различных хозяйственных нужд. Несмотря на схожие особенности формирования водных ресурсов бассейна Нижней Волги и Дона, качество воды в этих бассейнах формируется по-разному и адаптационные мероприятия для дальнейшего их использования должны учитывать эти особенности.

На основе имеющейся в открытом доступе межведомственной информации по водным ресурсам, водопотреблению на различные хозяйственные нужды и численности населения выполнены исследования по анализу динамики водопотребления и водобеспеченности за многолетний период, начиная с 1960 г. по настоящее время в условиях изменения климата.

В динамике использования водных ресурсов в России, начиная с 1960 года, когда появилась достаточно надежная водохозяйственная статистика, выделяются три, очень четких тренда.

В связи с количественными изменениями водных ресурсов под влиянием хозяйственной деятельности, которые стали заметными в 50-е годы XX в., резко возросло водопотребление к середине 70-х годов прошлого столетия. К этому времени водопотребление с 1960 года выросло с 32 км³ в год до 105 км³ в год при водозаборе от 37 км³ в год до 115 км³ в год соответственно. В этот же период на долю промышленности (с теплоэнергетикой) приходилось около 57% от водозабора, на орошение – 28%, коммунальное водопотребление – 10% и сельскохозяйственное водоснабжение – 5% (Бабкин, Балонишникова, 2018).

К 1990 г. водозабор снизился до 106 км³/год (при использовании воды в 96 км³/год), что объясняется в основном уменьшением промышленного водозабора.

Период с 1990–2020 г. характеризуется постоянным из года в год уменьшением объемов используемой воды с 96.2 км³/год до 47 км³/год, что объясняется социально-экономическим кризисом – резким сокращением промышленного и сельскохозяйственного производства, уменьшением орошаемых земель. Снижение водопотребления за этот период произошло на 49%.

Суммарный водозабор в 2023 г. в РФ составил 54.8 км³, а объем воды для использования – 48.7 км³, т. е. объем водозабора и использования воды незначительно увеличился по сравнению с 2020 г. Несмотря на этот незначительный рост, пока рано делать выводы о причинах этого роста за столь короткий период.

При общей тенденции снижения водопотребления за весь период учета использования вод наибольшие изменения произошли в промышленном и сельскохозяйственном водопотреблении.

По сравнению с 1985 г. – годом максимального водопотребления – использование воды в промышленных целях сократилось с 62.3 до 31.4 км³/год в 2015 г., т. е. в 2 раза, а в 2020 г. оно еще снизилось до 25 км³/год, т. е. почти в 3 раза по сравнению с 1985 г. На уровень 2023 г. промышленное водопотребление составило 26.7 км³/год.

Использование воды в сельском хозяйстве, главным образом на орошение, уменьшилось за этот же период более чем в 3 раза – с 24.8 до 7.1 км³/год в 2015 г., т. е. также почти в 3 раза по сравнению с 1985 г. В период 2020–2023 гг. сельскохозяйственное водопотребление находится на уровне 6.4 км³/год.

В меньшей степени сократилось использование воды на коммунальные нужды. В 2023 г. коммунальное водопотребление оценивалось в 6.0 км³/год.

Динамика водопотребления в России, в том числе по видам использования воды на различные хозяйственные нужды, приведена на рис. 1.

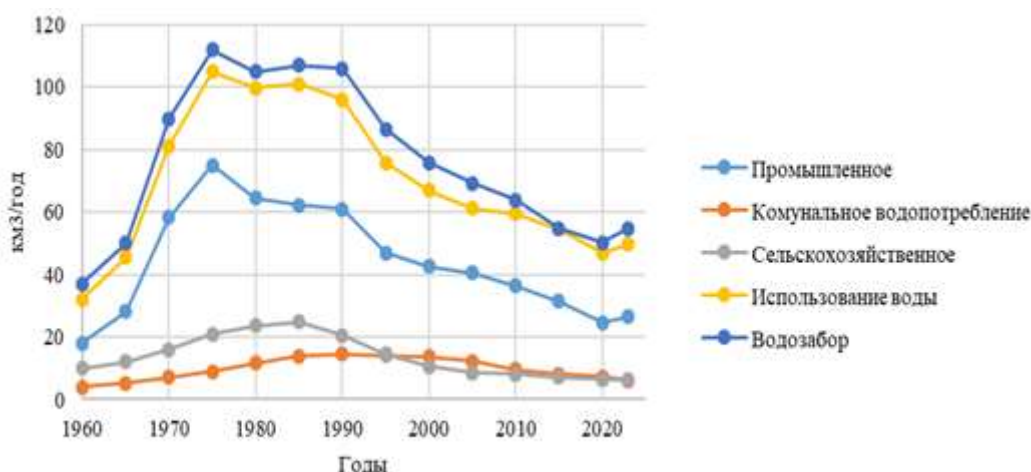


Рис. 1. Динамика использования воды в России по видам хозяйственной деятельности за период 1960–2023 гг., км³/год

По Федеральным округам тенденции водопотребления показывают резкое снижение водопотребления в Центральном, Приволжском, Южном и Сибирском Федеральных округах. Более сглаженная динамика наблюдается в Северо-Западном, Северо-Кавказском и Дальневосточном округах относительно стабильная ситуация с водопотреблением наблюдается в Уральском федеральном округе, в котором, начиная с 2010 г. водопотребление вышло на уровень 1990 г.

Водообеспеченность России на уровень 2024 г. составляла 30.4 тыс. м³ на человека. По Федеральным округам наименее обеспеченными водными ресурсами являются Центральный и Северо-Кавказский округа.

Выполненные исследования показателей водообеспеченности по всем субъектам РФ показали, что они изменяются в очень больших пределах, отражая исключительно высокую неравномерность в распределении по территории страны водных ресурсов, населения и водопотребления (рис. 2).



Рис. 2. Современная водообеспеченность в субъектах и федеральных округах (тыс. м³ на человека в год)

Низкая водообеспеченность наблюдается в целом ряде субъектов РФ, а в таких регионах как Калмыкия, Ставропольский край, Ростовская, Белгородская, Оренбургская, Курганская и Челябинская области, а также в Москве с областью имеет место «очень низкая» и «катастрофически низкая» водообеспеченность.

Для оценки причин изменения качества воды за многолетний период были проанализированы данные Роскомгидромета.

Основной особенностью современных изменений климата территории, как и всей территории России, является повышение температуры воздуха с конца 70-х годов XX века. Эта тенденция характерна и для бассейнов Дона и Нижней Волги. В результате потепления климата со второй половины 2000-х годов началась маловодная фаза, которая продолжается в обоих речных бассейнах до настоящего времени, со среднегодовым стоком р. Волга в створе Волжской ГЭС – 244 км³, р. Дон–Цимлянская ГЭС – 15 км³.

В результате падения промышленного и сельскохозяйственного производства в створе р. Волга–Волжская ГЭС с 1992 по 2023 гг. сокращение забора из речной сети составило 59.3% – с 28.0 до 11.4 км³/год, а сброса на 52.3% – с 20.83 до 9.90 км³/год. На зарегулированный участок, выше плотины Волжского гидроузла, приходится в среднем до 90% забора и сброса воды р. Волга. Величина загрязненных сбросов снизилась с 9.84 до 3.98 км³/год, составляя 90–95%, от всех сброшенных загрязненных вод в бассейн р. Волга. (рис. 3а).

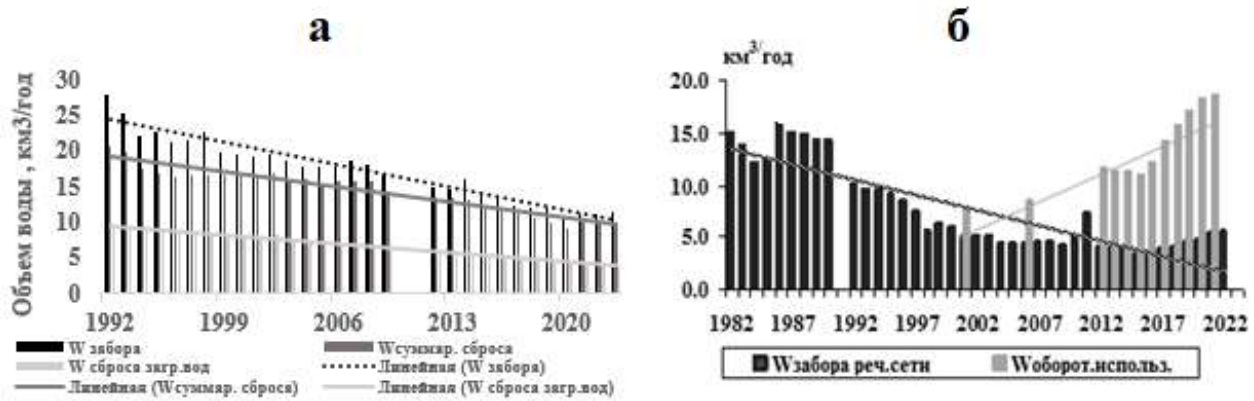


Рис. 3. Динамика забора и сброса природных вод и сброса загрязненных вод, р. Волга–Волжская ГЭС, 1992–2023 гг. (а); хронологический график объемов (W) оборотного пользования воды за 1982–2022 гг. в бассейне р. Дон (б). Прямыми линиями отмечены линейные тренды за рассматриваемый период

С начала 90-х годов в бассейне р. Волги использование оборотной и повторно-последовательной воды сократилось с 65.2 до 47.2 км³/год. 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 (Демин, 2023).

В 2020-х годах сокращение загрязненного сверхнормативного стока по отношению к концу 80-х годов (по трендам) величина ХПК уменьшилось в 1.3 раза, БПК – в 2.2 раза, снизившись до нуля в последние пять лет, нитратов в отдельные годы от 5 до 10 раз, меди – в 2.6 раза, фенолов – в 0.6 раза, нефтепродуктов – в 2.5 раза. Это привело к существенным изменениям внутригодового распределения загрязненного стока в 2010–2023 гг. Несмотря на маловодье, внутригодовое распределение качества воды Нижней Волги в последние годы значительно улучшилось для водопотребителей.

Аналогичная тенденция прослеживается и на Нижнем Дону. С начала 80-х годов величина забора воды во всем бассейне, включая Нижний Дон, упала с 15.0 до 5.0 км³/год. В маловодье 2007–2021 гг. падение забора продолжилось, наименьший забор был приурочен к 2015 г. – 4.2 км³/год (рис. 3б). Маловодье привело к ухудшению экологического состояния реки, включая качество воды, что заставило ограничить водопотребление всех категорий пользователей. Величина водообеспеченности в створе Цимлянского гидроузла снизилась в 2018–2022 гг. до уровня 2.70–2.72 тыс. м³/год/чел., т. е. до категории «низкая».

При этом величина сброса загрязненной сточной воды уменьшилась с 1.40 до 0.54 км³/год на фоне снижения величины годового стока. Это связано с введением мощностей оборотного и повторно-последовательного водоснабжения. С 2000 по 2022 гг. использование оборотной и повторно-последовательной воды в бассейне р. Дон увеличилось с 7.5 до 18.2 км³/год (рис. 1б). В годы экономической депрессии рост был незначительным, а после 2000 г. – весьма существенным (Балонишникова, Еремеева 2025).

Список литературы:

Бабкин В.И., Балонишникова Ж.А. Водный баланс, водные ресурсы и использование вод в крупнейших речных бассейнах России // Вопросы географии. Вып. 145. 2018. С. 35–48.

Балонишникова Ж.А., Еремеева А.О. Водообеспеченность Российской Федерации в условиях изменения климата. // Метеорология и гидрология. 2025. № 4. С. 87–97.

Демин А.П. Водопотребление и водоотведение в бассейне р. Волги, их влияние на качество воды // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 847–861.

Организация Объединенных Наций. Цель в области устойчивого развития. 6, Сводный отчет 2018 года о водоснабжении и санитарии. Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк, 2018.

УДК 631.6.02

**УПРАВЛЕНИЕ ЭРОЗИОННО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ – ОСНОВА
СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОТИВОЭРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ**

Барабанов А. Т.

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного
лесоразведения Российской академии наук, г. Волгоград, Россия, *barabanov-a@vfanc.ru*

Аннотация. Создание системы управления эрозионно-гидрологическим процессом необходимо строить на основе теоретических, концептуальных и практических положений: теории рельефообразования, формирования склонов и покровных отложений, закономерностей формирования стока, а защиту почв от эрозии осуществлять регулированием его на целых водосборах комплексом противоэрозионных мероприятий.

Ключевые слова: эрозия почв, сток талых вод, факторы стока и эрозии, прогноз стока

Основным инновационным направлением в прекращении деградации ландшафтов является разработка и осуществление адаптивно-ландшафтной системы земледелия, направленной на регулирование склонового стока, сокращение смыва почв, ослабление вредоносного действия ветров и засух. Целью разработки является создание условий для такой сельскохозяйственной деятельности, которая обеспечила бы достижение высокой продуктивности агроландшафтов без нарушения экологического баланса территории.

Идеологию современного адаптивно-ландшафтного подхода к обустройству сельскохозяйственных земель для борьбы с водной эрозией почв путем зарегулирования поверхностного стока комплексом противоэрозионных мероприятий на водосборах, начиная от водораздела до тальвега впервые высказал А. С. Козменко (1954). Им были разработаны основы противоэрозионной мелиорации, которые являются фундаментом современной адаптивно-ландшафтной системы земледелия. Важнейшими ее элементами являются противоэрозионная организация территории и агролесомелиоративное обустройство водосборов. Он впервые на основе, разработанной им теории рельефообразования в послетретичное время в результате эрозионно-гидрологического и эрозионно-аккумулятивного процессов сформулировал следующие основные принципы противоэрозионной мелиорации:

- необходимость различать древнюю и современную эрозию и не смешивать древние и современные эрозионные образования;
- учитывать формирование лессовых покровных отложений в результате древних эрозионно-гидрологического и эрозионно-аккумулятивного процессов;
- считать первостепенной негативную роль смыва почвы, как главного, наиболее опасного проявления эрозионно-гидрологического процесса, в сравнении с оврагообразованием;
- осуществлять регулирование поверхностного стока комплексом мероприятий на целых водосборах с охватом ими всех земель, начиная от водораздела до тальвега.

Комплексный подход к его регулированию и организация территории являются основой противоэрозионного обустройства сельскохозяйственных земель и в целом адаптивно-ландшафтного земледелия. Основным инновационным направлением в прекращении деградации ландшафтов является разработка и осуществление системы земледелия на ландшафтной основе. Наша работа базируется на следующих основных принципах:

- преемственности адаптивно-ландшафтного принципа идеям В. В. Докучаева в борьбе с засухой и научной школы эрозиоведения Козменко–Сурмача в противоэрозионной мелиорации (Козменко, 2023);

- новых теоретических знаниях об эрозионно-гидрологическом процессе, сформулированных в последние годы и выраженных математическими моделями;
- комплексном подходе (ныне адаптивно-ландшафтном) к разработке мер борьбы с эрозией путем регулирования стока на целых водосборах от водораздела до тальвега с учетом природно-ресурсного потенциала и факторов, обуславливающих сток;
- на нормативной базе, разработанной за последние 60–65 лет.

Для разработки системы высокоэффективных противоэрозионных мероприятий необходимо знать какие факторы наиболее мощно влияют на водопоглощение и сток и как на них можно воздействовать, чтобы предотвратить его формирование или уменьшить в значительной степени.

Создание системы управления ЭГП должно осуществляться на основе разработанных ранее нижеследующих теоретических, концептуальных и практических положений (Барабанов, 2025):

- теория рельефообразования, формирования склонов и покровных отложений в результате древнего эрозионно-аккумулятивного процесса, протекающего в четвертичный период, заключается в необходимости различать древнюю и современную эрозию и соответствующие эрозионные образования;
- считать плоскостной смыв почвы наиболее опасным явлением по сравнению с оврагообразованием и осуществлять защиту почв от эрозии регулированием стока на целых водосборах комплексом противоэрозионных мероприятий;
- учитывать, что функция формы склона и функция эрозионно-аккумулятивного процесса тождественны и выражать ее посредством логистического уравнения (Гаршинев, 1999).

Эти принципы совершенствовались многими поколениями ученых и стали основой современных адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Тогда этот подход не назывался адаптивно-ландшафтным, но по своей сути он был именно таким. Важно отметить, что главным, как в борьбе с засухами и суховеями по В. В. Докучаеву (1951), так и в борьбе с эрозией почв по А. С. Козменко (1954), является регулирование водного режима сельскохозяйственных земель. Для этого необходимо знание закономерностей формирования склонового стока, влияние на него природных и антропогенных факторов и их взаимодействия.

Для регулирования водного режима на всем водосборе необходимо создание новой теории, концептуальных направлений, параметров и критериев эрозионно-гидрологического процесса на водосборных бассейнах в условиях усиления антропогенного воздействия на экосистемы; обоснование принципов создания систем управления этим процессом с целью снижения эрозии почв; разработки технологии цифрового проектирования систем адаптивно-ландшафтного земледелия с целью предотвращения деградации сельскохозяйственных земель. Для этого необходимо решение следующих задач: разработать теорию водопоглощения и формирования поверхностного стока талых вод с сельскохозяйственных угодий на основе концепции образования ледяного экрана при уровнях природных факторов выше лимитирующих; разработать теоретические основы управления взаимодействием природных и антропогенных факторов, обуславливающих эрозионно-гидрологический процесс; выявить закономерности снегоотложения под влиянием метельных ветров разного характера и создать модели формирования снежного покрова на водосборах с целью разработки средств предотвращения глубокого промерзания почвы; усовершенствовать методику высокоточного прогноза весеннего стока с учетом новой теории его формирования; обосновать закономерности и разработать модели формирования стока на разных типах почв, видах угодий и пашни; на основе знания закона лимитирующих факторов весеннего стока создать новые высокоэффективные стокорегулирующие и противоэрозионные приемы и дать им экспериментальную оценку; разработать технологию цифрового проектирования систем адаптивно-ландшафтного земледелия, обеспечивающих предупреждение эрозии почв.

Теоретической основой формирования поверхностного стока талых вод является закон лимитирующих факторов (Барабанов, 2017), заключающийся в том, что при некотором значении ниже лимитирующего уровня одного из трех природных факторов (глубина промерзания меньше 50 см, снегозапасы меньше объема свободных пор в слое 0-30 см и запасы воды в почве меньше 70-120 мм по природным зонам) сток не формируется независимо от уровня двух других, а при их уровнях выше лимитирующих сток всегда формируется, а для создания теоретической базы его формирования на основе генетического подхода требуется знание закономерностей процесса взаимодействия талой воды с мерзлой почвой. Таким образом, установлены закономерности формирования поверхностного стока талых вод при уровнях факторов ниже лимитирующих, выявлен генезис процесса и создана теория его формирования, то есть при этих условиях сток не формируется. При уровнях же факторов выше лимитирующих, мы разработали статистические модели формирования стока на разных типах почв. Они при расчетах стока дают довольно близкую сходимость, но не во всех зонах репрезентативность их достаточна. Требуется разработать теоретическую базу формирования стока на основе знания генезиса эрозионно-гидрологического процесса. Для его понимания и разработки теории формирования стока при глубоком промерзании почвы необходимо рассмотреть результаты исследований процесса инфильтрации влаги в мерзлую почву с позиций теплообмена (Калужный и др., 1985) между впитывающей талой водой и мерзлой почвой.

Теория формирования склонового стока при этих условиях основывается на разработанных нами следующих фундаментальных положениях, объясняющих физику эрозионно-гидрологического процесса и позволяющих создать систему управления этим процессом (Барабанов, 2025): впитывание талой воды в мерзлую почву происходит путем просачивания ее в свободные поры в верхнем оттаивающем слое мощностью не более 30 см; при уровнях факторов выше лимитирующих количество впитавшей воды обусловлено образованием ледяного экрана на границе между мерзлым нижним и оттаявшим верхним слоями; к концу снеготаяния почва успевает оттаять на глубину не более 30 см с колебаниями от 3 до 30 см по годам и природным зонам, то есть водопоглощение происходит в этом слое; величина водопоглощения в мерзлую почву зависит от объема свободных пор; на формирование стока влияет влажность верхнего слоя почвы, от которой зависит объем свободных пор.

Таким образом, при глубоком промерзании почвы (более 50 см) и больших запасах влаги в почве и снеге величина стока зависит от снегозапасов и объема свободных пор в верхнем слое (0–30 см) почвы, который в свою очередь зависит от ее увлажнения. Количество воды, просочившейся в оттаявший слой выше ледяного экрана равно объему свободных пор. Если запасы снеговой воды больше этого объема, то излишки ее стекают, то есть из них формируется поверхностный сток талых вод.

Эти закономерности позволяют получить более правильное представление об эрозионно-гидрологическом процессе на сельскохозяйственных землях. Их можно применять при обосновании элементов противоэрозионного комплекса, их сочетаний и разрабатывать адаптивно-ландшафтную систему земледелия в целом. Они могут служить теоретической и нормативной базой при разработке системы управления эрозионно-гидрологическим процессом на расчетной основе для обустройства комплексных балочных и малых речных водосборов.

Опираясь на изложенные выше положения нами разработан новый способ прогнозирования стока на сельскохозяйственных угодьях за 30–45 дней до начала снеготаяния для условий, когда природные факторы стока выше лимитирующего уровня (Патент, 2023). Заключается он в измерении глубины промерзания почвы, определении запасов воды в снеге и почве, расчете порозности почвы на основе определения ее удельной и объемной массы. Главное отличие этого способа от других состоит в том, что эти показатели определяются только в слое до 30 см, так как известно, что только в этом слое происходит процесс впитывания (термоинфильтрации). Общая величина стока рассчитывается по формуле:

$$Y = W_c - \left[\left(1 - \frac{d_v}{d} \right) * 1000 * h - W_n \right],$$

где Y – величина стока, мм; W_c – запасы воды в снеге, мм; W_n – запасы воды в почве, мм; d_v – объемная масса почвы, г/см³; d – удельная масса почвы, г/см³; h – прогнозная мощность оттаявшего к концу снеготаяния слоя почвы, м.

Список литературы:

Барабанов А.Т. Эрозионно-гидрологическая оценка взаимодействия природных и антропогенных факторов формирования поверхностного стока талых вод и адаптивно-ландшафтное земледелие. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2017. 188 с.

Барабанов А.Т. Научные основы управления эрозионно гидрологическим процессом на склоновых землях путем формирования почвозащитных систем адаптивно-ландшафтного земледелия // Почвоведение. 2025. № 10. С. 1367–1377.

Гаршинёв Е.А. Эрозионно-гидрологический процесс и лесомелиорация: Теория и модели. Волгоград: ВНИАЛМИ, 1999. 196 с.

Докучаев В.В. Преобразование природы степей. Наши степи прежде и теперь. Том 6. Сочинения в 9 томах. / М.-Л.: АН СССР, 1951. 359 с.

Калюжный И.Л., Павлова К.К., Лавров С.А. Гидрофизическое обоснование мероприятий по задержанию талых вод на полях зоны богарного земледелия // Метеорология и гидрология. 1985. № 7. С. 90–100.

Козменко А.С. Борьба с эрозией почв. М.: Сельхозгиз, 1954. 229 с.

Козменко А.С. Борьба с эрозией почвы на сельскохозяйственных угодьях /Избранные труды научной школы эрозиоведения А. С. Козменко, Г. П. Сурмача. Волгоград. ФНЦ агроэкологии РАН. Том 1. 2023. 726 с.

Патент RU 2790452 A01 13/16, G01N 33/24 Способ прогнозирования поверхностного стока талых вод в агроландшафтах на водосборных бассейнах Волги и Дона : № 2021126560 : заявл. 08.09.2021 : опубл. 21.02.2023 г. / А. Т. Барабанов. ; заявитель ФНЦ агроэкологии РАН.

УДК 91:504

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОЕКТА ГЭС «ЭГИЙН ГОЛ» НА ТРАНСГРАНИЧНЫЙ БАССЕЙН
РЕКИ СЕЛЕНГИ И ОЗЕРО БАЙКАЛ**

Никитина О.И.¹, Хотулева М.В.², Шварц Е.А.¹, Буторин А.А.¹, Кирилук О.К.³,
Егидарев Е.Г.¹, Килина М.А.², Байбар А.С.¹, Орлова И.И.⁴

¹Центр ответственного природопользования Института географии РАН, Москва, Россия,
oxana.niki@yandex.ru

²Центр по экологической оценке «Эколайн», Москва, Россия

³Русское Общество Сохранения и Изучения Птиц им. М.А. Мензбира, Москва, Россия

⁴Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск,
Россия

Аннотация. Представлены результаты первого этапа комплексной экологической оценки возможного воздействия проекта ГЭС «Эгийн гол» на экосистемы бассейна р. Селенги и озера Байкал. Выполнена предварительная оценка состояния экосистем и выделены зоны потенциальных воздействий. Принято за основу положение методологии ЮНЕСКО об основной направленности оценки на анализ воздействия проекта на выдающуюся универсальную ценность объекта Всемирного наследия.

Ключевые слова: река Селенга, озеро Байкал, гидрологический режим, трансграничные водные объекты, гидроэнергетика, экологическая оценка, Всемирное наследие

Планы развития гидроэнергетики в Монголии в трансграничном бассейне реки Селенги имеют стратегическое значение для гидрологического режима и состояния водных и прибрежных экосистем региона, включая озеро Байкал – объект Всемирного природного наследия ЮНЕСКО. Ранее Монголия планировала строительство четырех гидросооружений в бассейне Селенги; в настоящее время рассматриваются различные конфигурации проекта гидроэлектростанции на реке Эгийн гол – притоке Селенги. Поскольку река Селенга обеспечивает около половины притока воды в Байкал (Схема..., 2014), регулирование ее стока способно оказать влияние на экосистемы дельты Селенги и прибрежной зоны озера. Учитывая это, Монголия и Россия договорились о совместном проведении комплексной экологической оценки с учетом методологии ЮНЕСКО, чтобы подготовить единое научно обоснованное заключение.

Строительство и эксплуатация гидроэнергетических сооружений сопровождаются изменением сезонной и внутригодовой динамики стока, трансформацией русловых и пойменных процессов, фрагментацией экосистем и нарушением миграций гидробионтов (Сборник..., 2017; Бычков и др., 2018). В трансграничных бассейнах это особенно важно из-за асимметрии выгод и экологических рисков между странами, расположенными в верхней и нижней частях бассейна.

На первом этапе работы междисциплинарная рабочая группа ИГ РАН совместно с Центром по экологической оценке «Эколайн» завершила скрининг – предварительную оценку, направленную на определение необходимости и формы дальнейшей комплексной оценки воздействия. В ходе этого этапа выполнен сбор и систематизация природных, гидрологических и социально-экономических данных, проведен обзор международных и российских процедур экологической оценки, включая рекомендации ЮНЕСКО (Руководство..., 2024), а также предварительная оценка состояния водных и прибрежных экосистем по абиотическим и биотическим показателям.

Абиотические характеристики отражают физико-географические условия, гидрологический и гидрохимический режимы, сток наносов и ледовый режим. Для

пространственного описания ряда абиотических характеристик сформирована картографическая база на основе данных *HydroSHEDS* (2025) и *Global Surface Water Explorer* (*GSWE*) (Pekel et al., 2016). Картографирование пойменных и долинных территорий на участке от створа проектируемой ГЭС до устья р. Селенги позволило определить морфологические особенности речной системы, влияющие на водообмен между руслом и поймой. Предварительный анализ меж- и внутригодовой изменчивости водных объектов по данным *GSWE* выявил пространственные тенденции и зоны возможных изменений водного режима (рис. 1).

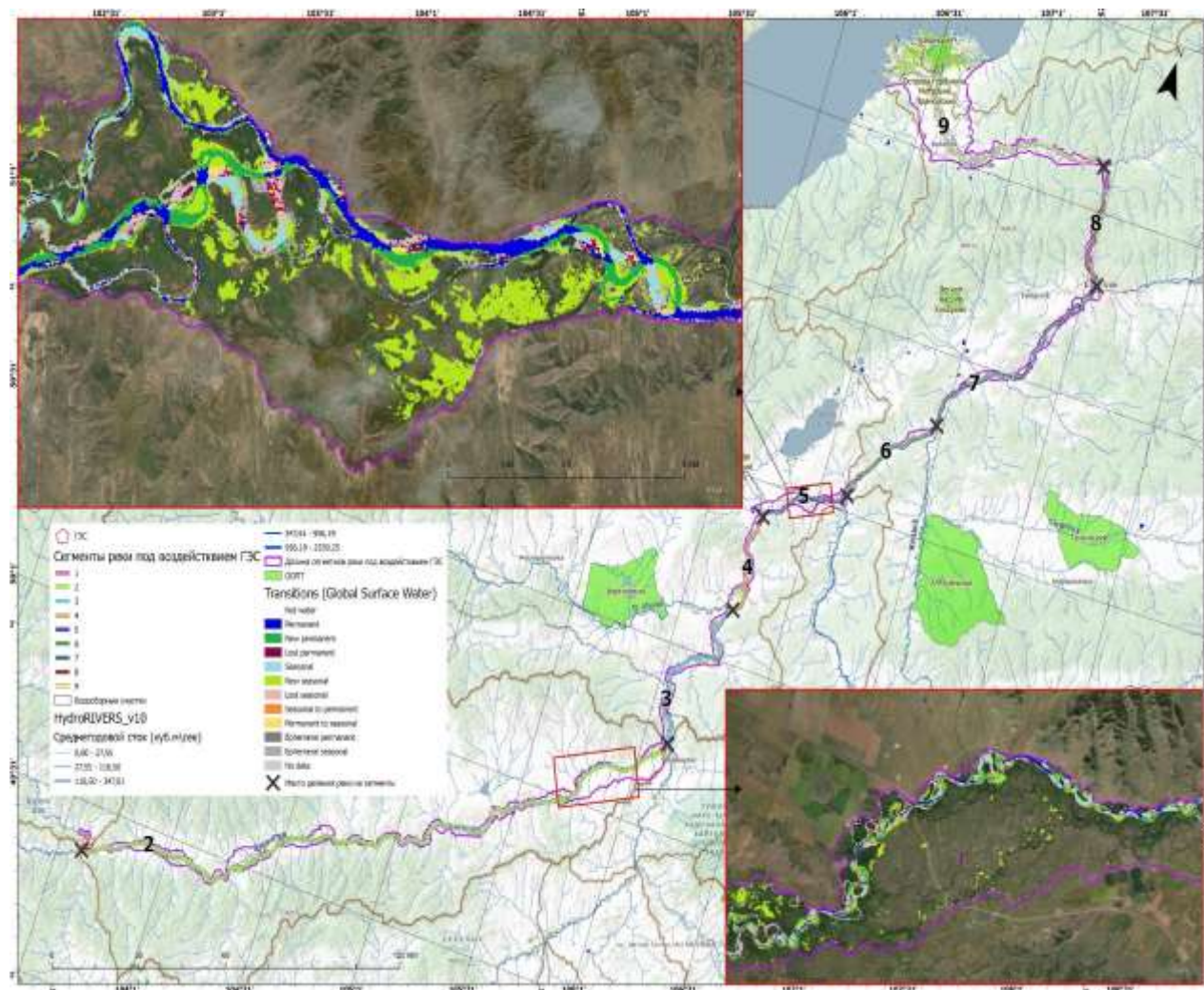


Рис. 1. Изменение водной поверхности по данным *Global Surface Water Explorer* на выделенных сегментах реки

Биотические характеристики даны в отношении флоры и фауны Байкальской природной территории и бассейна Селенги, включая гидробионтов, земноводных, пресмыкающихся, птиц и млекопитающих. При анализе учитывались высокая эндемичность экосистем озера Байкал, экотонный характер водных и прибрежных экосистем бассейна Селенги, значение территории для миграций позвоночных и степень хозяйственной освоенности. Ранее проведенные исследования содержат обширные сведения о биоте региона и возможных последствиях регулирования стока (Бычков и др., 2018; Базов, Базова, 2017; Убугунов и др., 2015); дальнейший анализ предполагает междисциплинарный подход с акцентом на риски утраты или деградации характеристик, обеспечивающих выдающуюся универсальную ценность (ВУЦ) объекта Всемирного наследия «Озеро Байкал», прежде всего

связанные с изменением гидрологического режима, его влиянием на экосистемные процессы и синергетическими эффектами с учетом климатических и антропогенных воздействий.

Проведенные работы показали, что методология ЮНЕСКО соответствует международным принципам экологической оценки и учитывает специфику уникального статуса объекта. Центральное место занимает понятие ВУЦ, формирующее основу анализа допустимости воздействия намечаемой деятельности на нее и другие значимые природоохранные характеристики (The Operational Guidelines..., 2025). В рамках методологии составлены первичные таблицы ценностей и характеристик объекта Всемирного наследия «Озеро Байкал» на основе материалов номинации 1995 г. (WHC, 1995), технической оценки МСОП и решений Комитета Всемирного наследия (UNESCO..., 2025). Дальнейшее уточнение данных планируется с учетом национального и местного уровней признания природоохранных ценностей.

Определены методические подходы к комплексной экологической оценке воздействия проекта ГЭС «Эгийн гол» на российскую часть бассейна реки Селенги и озеро Байкал. Выделены ключевые факторы (аспекты) и показатели для анализа воздействия на абиотические и биотические компоненты экосистем, а также социальную среду. Масштаб исследования охватывает семь районов Республики Бурятия и город Улан-Удэ – соответственно, оценка носит региональный характер. Для систематизации воздействия предварительно выделены четыре зоны: потенциальных прямых экологических воздействий (русла рек и пойменно-русловые участки), потенциальных косвенных экологических воздействий (долина реки), расширенная зона экологических исследований (около 5 км за пределами долины) и зона социальных исследований.

На данном этапе скрининга определены ключевые экологические и социальные аспекты: фрагментация экосистем, нарушение миграций гидробионтов и наземной фауны, трансформация русловых и прибрежных участков, изменение гидрологического и микроклиматического режимов, ухудшение качества воды, снижение продуктивности и изменение видового состава флоры и фауны; социальные – затопление, ограничение водопользования, риски, связанные с выявленными экологическими аспектами, в т.ч. в сфере традиционного природопользования и рекреации. Выявленные аспекты будут уточняться на этапе подробной оценки (скоупинга) командой специалистов разных дисциплин, включая биологов, экологов, гидрологов и энергетиков. Полученные данные позволят сформировать системное понимание потенциального влияния строительства и эксплуатации ГЭС «Эгийн гол» на экосистемы Селенги и Байкала и подготовить основу для научно обоснованных рекомендаций по управлению экологическими рисками.

Таким образом, полученные результаты формируют методическую и информационную основу для дальнейшего междисциплинарного анализа и последующих этапов экологической оценки воздействия проекта.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Комплексная экологическая оценка воздействия монгольского проекта “ГЭС Эгийн гол” на территорию Российской Федерации, озеро Байкал» (шифр научной темы FWEW-2025-0001, № госрегистрации 125091110246-2).

Список литературы:

Базов А.В., Базова Н.В. Оценка воздействия планируемого строительства каскада монгольских ГЭС на реке Селенге на ихтиофауну в нижнем бьефе (включая озеро Байкал) // Вестник рыбохозяйственной науки. 2017. Т. 4. № 2 (14). С. 45–58.

Бычков И.В., Никитин В.М., Абасов Н.В., Осипчук Е.Н., Бережных Т.В., Орлова И.И., Борисова Н.Г. Оценка воздействия на трансграничный бассейн реки Селенги в границах

Российской Федерации в связи с планами строительства гидроэнергетических объектов на территории Монголии // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2018. Т. 24. С. 56–85.

Руководство и методическое пособие по оценке воздействия в контексте Всемирного наследия / UNESCO, ICCROM, ICOMOS, IUCN. – Париж; Рим; Женева: UNESCO; ICCROM; ICOMOS; IUCN, 2024. – 87 с. URL: <https://whc.unesco.org/en/guidance-toolkit-impact-assessments/> (дата обращения 27.01.2026). DOI 10.58337/SLRP7810

Сборник инновационных решений по сохранению биоразнообразия для гидроэнергетического сектора / А. Б. Алибеков и др. под научной ред. Н. И. Коронкевича. 2017. 338 с.

Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Селенга. Книга 1. Утверждена приказом Енисейского ББУ от 24 июня 2014 г. № 100. – Красноярск: Енисейское ББУ, 2014.

Убугунов Л.Л., Борисова Н.Г., Аненхонов О.А., Балданова Д.Р., Базова Н.В., Убугунов В.Л. Возможные эколого-биологические последствия сооружения гидроэлектростанции на реке Селенге и ее притоках в Монголии // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2015. Т. 12. С. 58–72.

Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales (HydroSHEDS). 2025. Режим доступа: <https://www.hydrosheds.org/hydrosheds-v2> (дата обращения 27.01.2026)

The Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention. WHC.25/01. 2025. Режим доступа: <http://whc.unesco.org/en/guidelines/> (дата обращения 27.01.2026).

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A.S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. Vol. 540 (7633). Pp. 418–422.

UNESCO World Heritage Centre. Lake Baikal / World Heritage List. 2025. Режим доступа: <https://whc.unesco.org/en/list/754> (дата обращения: 27.01.2026).

World Heritage Committee (WHC). WHC Nomination documentation for inscription of the property “Lake Baikal”. 1995. Режим доступа: <https://whc.unesco.org/en/documents/113201> (дата обращения: 27.01.2026).

УДК 628.1

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ РЕГИОНОВ БАСЕЙНА Р. ВОЛГИ КАЧЕСТВЕННОЙ ПИТЬЕВОЙ ВОДОЙ

Демин А.П.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, *deminap@mail.ru*

Аннотация. Цель работы – анализ и оценка современного состояния обеспечения населения регионов бассейна р. Волги качественной питьевой водой. Приведены сведения об обеспеченности жилого фонда регионов централизованным водоснабжением в 2000–2024 гг. Показан рост изношенности водопроводной сети и его влияние на увеличение утечек. Доля населения, обеспеченного качественной питьевой водой, значительно изменяется по регионам бассейна.

Ключевые слова: централизованное водоснабжение, изношенность водопроводной сети, утечки воды, подземные воды, удельное водопотребление, питьевая вода, качество воды в источниках

В России обеспечение населения качественной питьевой водой становится одной из приоритетных проблем государственной политики, направленной на сохранение здоровья и улучшение условий проживания. Однако до сих пор большое количество жителей пользуются децентрализованными источниками водоснабжения или водой, не прошедшей необходимую водоподготовку. Около 13% водопроводов не соответствует санитарно-эпидемиологическим требованиям (О состоянии..., 2025). Основными причинами неудовлетворительного качества питьевой воды являются: антропогенное загрязнение поверхностных и подземных вод, отсутствие или ненадлежащее состояние зон санитарной охраны водоисточников, использование старых технологических решений водоподготовки³⁵.

Обобщающих работ, в которых анализируются проблемы централизованного водоснабжения и обеспечение населения питьевой водой в масштабах крупных регионов, тем более в динамике, крайне мало (Демин, 2019; Демина, 2010). Большинство публикаций носит узко региональный характер, данные приводятся обычно за небольшое число лет (Бойцов и др., 2015; Павлова и др., 2017; Шнейдерман, Пилипенко, 2023).

В бассейн р. Волги входят полностью или частично территории 38 субъектов Российской Федерации, в том числе 8 республик, 28 областей, Пермского края и г. Москвы. Волжский бассейн – важнейший в экономическом отношении регион России. Здесь производится почти половина валового регионального продукта и промышленной продукции России, более трети сельскохозяйственной продукции, что определяет высокую степень антропогенной нагрузки. На начало 2023 г. на территории бассейна проживало 61.3 млн человек (41.8% населения страны), из них 49.5 млн – в городах (Демин, 2023).

Проблема обеспечения населения бассейна Волги питьевой водой нормативного качества и в достаточном количестве с каждым годом обостряется. Роль подземных вод в централизованном водоснабжении городских жителей все более возрастает, так как качество воды большинства поверхностных источников водоснабжения не соответствует нормативным требованиям.

Анализ обеспечения населения централизованным водоснабжением, современного состояния водопроводного хозяйства основывался на материалах Росстата (статистические

³⁵ Сайт автоматизированной информационной системы «Реформа ЖКХ». <https://ais.reformagkx.ru> (дата обращения 14.01 2026)

сборники «Жилищное хозяйство в России»³⁶, «Охрана окружающей среды в России»³⁷, данных о благоустройстве жилищного фонда, коммунальном хозяйстве, приборах учета потребления услуг и т. д), материалах Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС)³⁸. Объем водопотребления из подземных источников, роли подземных вод в балансе хозяйственно-питьевого водоснабжения основывался на данных информационных материалов о состоянии недр³⁹. Для анализа доли населения, обеспеченного качественной питьевой водой из систем водоснабжения, использовали данные сайта АИС «Реформа ЖКХ», государственного доклада Роспотребнадзора (О состоянии..., 2025).

Основным методом исследования является статистический анализ данных наблюдений и государственной отчетности.

Доля жилого фонда, оборудованного водопроводом, увеличивается в России медленными темпами. С 2000 по 2024 г. она выросла всего на 13.8 процентных пунктов (п. п.) с 73.4 до 87.2 %. Среднегодовой прирост этого показателя в 21 в. составил менее 0.6 п. п. При этом в городских поселениях эта доля увеличилась на 7, а в сельской местности на 31.8 п. п. В 2024 г. только 70% сельского жилищного фонда России оборудовано водопроводом.

В бассейне р. Волги в настоящее время >90% жилого фонда оборудовано водопроводом в Московской, Тульской, Оренбургской, Самарской, Ульяновской областях, Республике Татарстан, г. Москве (табл. 1; приведены субъекты РФ, не менее 30% территории которых входит в бассейн). В Вологодской и Ивановской областях – менее 75%.

Объемы ввода в действие новых водопроводных сетей являются очень низкими и по сравнению с началом 1990-х годов они сократились в несколько раз. В результате объемы водопроводной сети, нуждающиеся в замене, с годами резко возрастают. Наибольшие темпы роста изношенности сети в 21 в. характерны для Калужской, Тамбовской, Волгоградской областей, Республики Марий Эл. В 2024 г. максимальная изношенность уличной водопроводной сети (более 50%) отмечалась в Калужской, Рязанской, Астраханской, Волгоградской и Самарской областях.

Рост изношенности водопроводной сети является главной причиной увеличения доли утечек и неучтенных расходов воды. Утечка воды происходит при транспортировке воды к потребителям вследствие неисправности труб водопроводной сети, их соединений, запорной арматуры, гидрантов, а также аварий на сети. Относительно небольшая доля утечек отмечается в настоящее время в г. Москве и Московской области, Республике Татарстан и Чувашии. Но в Пермском крае и Саратовской области они превышают 30%, а в Тульской и Астраханской областях – 36%. Это крайне расточительно, так как на подготовку и перекачку воды были затрачены значительные средства.

Потери воды сопровождаются нанесением, помимо экономического и экологического, еще и значительного социального вреда, поскольку плохое состояние водопроводных сетей наносит значительный ущерб здоровью населения. Это основной источник не только утечек, но и поступления загрязнений в саму сеть из-за перепадов давления в ней. Именно поэтому у нас оказываются совершенно недостаточными стандартные для развитых стран системы водоподготовки.

³⁶ Жилищное хозяйство в России. 2004–2022: Стат. сб./ Росстат. – Приложение к сборнику (информация в разрезе субъектов Российской Федерации), 2016–2022. <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13234> (дата обращения 14.01 2026)

³⁷ Охрана окружающей среды в России. 2006–2024: Стат. сб./ Росстат. – Приложение к сборнику (информация в разрезе субъектов Российской Федерации). <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13209> (дата обращения 14.01 2026)

³⁸ Сайт Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС). <https://www.fedstat.ru>. (дата обращения 14.01 2026)

³⁹ Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2004–2024 гг. Вып.28–48. <https://geomonitoring.ru/download/IB> (дата обращения 14.01 2026)

Таблица 1. Основные показатели водопроводного хозяйства и водообеспечения населения в регионах бассейна р. Волги в 2000–2024 гг., %

Наименование субъекта РФ	Доля жилого фонда, оборудованная водопроводом		Доля уличной водопроводной сети, нуждающейся в замене		Доля утечек в общем объеме воды, поданной в сеть	Доля подземных вод в балансе ХПВ	Доля населения, обеспеченного качественной питьевой водой
	2000 г.	2024 г.	2005 г.	2024 г.	2024 г.	2024 г.	2024 г.
Владимирская обл.	75.2	86.6	38.6	45.9	20.3	91	91.9
Вологодская обл.	64.2	74.9	27.7	42.8	18.1	40	64.2
Ивановская обл.	63.8	74.9	30.8	44.3	17.5	55	88.9
Калужская обл.	69.1	83.4	30.7	53.5	29.7	56	88.4
Костромская обл.	62.2	80.2	37.1	46.0	24.5	19	81.1
Московская обл.	83.4	91.4	26.2	36.6	13.0	78	94.5
Орловская обл.	62.1	81.9	32.1	44.6	17.4	94	94.2
Рязанская обл.	68.9	88.0	37.6	51.1	21.4	65	92.5
Тамбовская обл.	58.7	85.3	30.9	47.7	22.3	100	92.9
Тверская обл.	59.4	68.1	43.7	43.7	20.7	86	85.8
Тульская обл.	82.1	92.9	45.0	40.9	36.0	100	93.5
Ярославская обл.	76.8	83.1	26.8	30.3	24.6	7	92.1
г. Москва	99.8	97.7	40.6	47.8	11.0	5	99.6
Астраханская обл.	65.2	87.5	53.3	57.5	38.5	< 1	76.6
Волгоградская обл.	65.6	85.9	35.9	53.9	20.3	12	88.0
Респ. Башкортостан	64.5	84.5	35.7	33.4	19.8	81	91.0
Респ. Марий Эл	67.7	84.7	25.7	47.7	17.9	100	93.9
Респ. Мордовия	59.8	87.4	42.7	42.9	18.7	100	90.2
Респ. Татарстан	77.9	97.9	35.1	30.3	13.8	27	95.6
Удмуртская Респ.	73.8	89.9	37.3	39.8	21.6	37	95.6
Чувашская Респ.	56.0	75.5	35.4	33.7	11.9	9	91.6
Пермский край	74.2	87.5	45.3	40.0	30.1	43	93.9
Кировская обл.	73.2	86.0	40.5	38.6	20.0	38	87.7
Нижегородская обл.	75.6	88.1	41.5	45.5	16.5	45	90.6
Оренбургская обл.	68.1	90.5	33.4	41.0	21.0	37	97.9
Пензенская обл.	64.1	84.8	38.7	30.2	27.7	36	98.2
Самарская обл.	83.6	95.3	45.2	51.8	24.1	42	88.3
Саратовская обл.	70.3	83.1	38.8	43.0	33.0	25	85.1
Ульяновская обл.	70.4	90.8	37.1	46.4	24.6	52	97.3

Состояние водопроводно-канализационного хозяйства оценивается как кризисное. 48% водоканалов являются государственными или муниципальными унитарными предприятиями. Все они имеют кредиторскую задолженность. Возможностей погасить долги у большинства предприятий нет, т.к. отрицательная рентабельность наблюдается у 70% их количества. Предприятия финансово парализованы и только прямые субсидии, федеральные или региональные, помогают строить новые объекты, менять сети и т.д.⁴⁰.

Объем использования воды из подземных источников для хозяйственно-питьевого водоснабжения (ХПВ) в целом по России в настоящее время равен объему использования воды

⁴⁰ Исполнительный директор РАВВ Елена Довлатова рассказала «РГ» о тарифах на воду. <https://rg.ru/2025/01/07/kaplia-v-more.html>

из поверхностных источников В 6 регионах волжского бассейна доля подземных вод в балансе ХПВ составляет 90–100%, но в г. Москве, Астраханской и Ярославской областях, Чувашской Республике – менее 10%.

Ситуация с обеспеченностью населения качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения из года в год улучшается. В рамках региональных проектов «Чистая вода» реализуются разнообразные мероприятия (установка современных станций водоподготовки, ремонт и строительство сетей водоснабжения, обустройство зон санитарной охраны источников централизованного водоснабжения и пр.), ведущие к росту населения, обеспеченного качественной водой. За период 2018–2024 гг. доля населения РФ, обеспеченная качественной питьевой водой, выросла на 3.6 процентных пункта.

В настоящее время наибольшее количество людей в бассейне р. Волги обеспечено качественной водой в Оренбургской, Пензенской, Ульяновской областях (>97%) и особенно в г. Москве (99.6%). Неудовлетворительна ситуация с этим важным показателем в Костромской (81.1%), Астраханской (76.6%) и особенно Вологодской (64.2%) областях.

Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 Государственного задания ИВП РАН, государственная регистрация № 125030703344-8

Список литературы:

Бойцов С.А., Самородская И.В., Третьяков В.В, Ватолина М.А. Потерянные годы жизни в результате преждевременной смерти и их взаимосвязь с климатическими и социально-экономическими показателями регионов // Вестник Российской академии медицинских наук. 2015. Т. 70. №4. С. 456–463. DOI: 10.15690/vramn.v70.i4.1412

Демин А.П. Региональные различия в обеспечении населения России централизованным водоснабжением и безопасной питьевой водой // Региональные исследования. 2019. № 2 (64). С. 80–91.

Демин А.П. Водопотребление и водоотведение в бассейне реки Волги, их влияние на качество воды // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 27. № 6. С. 847–861. DOI: 10.31857/S2587556623060055

Демина Л.А. Вода, вода, кругом вода (или коммунальное водоснабжение регионов России) // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. № 7. С. 36–41.

О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. 424 с.

Павлова С.А., Павлов И.Е., Островский С.С. Политика водного ресурсосбережения в Российской Федерации // Вестник РУДН. Серия: Государственное и муниципальное управление. 2017. Вып. 4. № 3. С. 225–245.

Шнейдерман И.М., Пилипенко И.В. Модернизация системы водоснабжения и водоотведения в сельской местности как фактор повышения качества жизни населения России // Народнонаселение. 2023. Т. 26. № 1. С. 147–159.

УДК 556.5

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕКИ АМУР И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Махинов А.Н.

Институт водных и экологических проблем ХФИЦ ДВО РАН, Хабаровск, Россия,
amakhinov@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности гидрологического режима реки Амур в нижнем течении на основе анализа современных тенденций их изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. Выявлены особенности формирования катастрофических наводнений, активизации русловых процессов и основные причины загрязнения водных ресурсов.

Ключевые слова: Амур, водный режим, русловые процессы, загрязнение воды

Бассейн реки Амур является самой крупной в России трансграничной территорией, занимающей значительные части России, Китая и Монголии. Разнообразие и богатство минеральных, водных, биологических и земельных ресурсов обуславливают их активное освоение. Вместе с тем в бассейне Амура ценностью мирового значения является уникальное неповторимое разнообразие ландшафтов, редчайшие виды растений и животных и их уникальное сочетание. По видовому разнообразию рыб река Амур занимает первое место в России.

Особенности географического положения и своеобразие природных процессов бассейна реки Амур обуславливают высокую степень экологической уязвимости его природных комплексов. Амурский бассейн расположен на территории с неустойчивыми условиями формирования стока. Для крупных рек характерно отчетливо выраженное естественное многолетнее колебание водности и русловых деформаций, влияющих на хозяйственную деятельность, безопасность судоходства, устойчивость водохозяйственных сооружений и береговых объектов.

В настоящее время природная среда бассейна реки Амур подвергается существенному преобразованию, что не только во многом осложняет условия хозяйственной деятельности и жизни людей, но и наносит большой ущерб экономике региона, особенно его перспективному развитию (Ганзей, 2004). Все более возрастающее антропогенное воздействие наиболее отчетливо сказывается на состоянии водных ресурсов и условиях их безопасного использования.

Среди основных особенностей современного гидрологического режима, влияющих на водохозяйственную деятельность в нижнем течении реки Амур, следует отметить следующие.

Изменение водного режима. Сток воды в нижнем течении реки Амур имеет четко выраженный естественный циклический характер, выраженный в чередовании периодов высокой и низкой водности продолжительностью по 12–17 лет (Махинов и др., 2023 и др.). За 130-летний период наблюдений выявлено 4 полных цикла. При этом в последнем цикле с конца 1990-х годов прошлого века отмечались экстремальные количественные показатели максимального и минимального характеристик стока реки, обусловленные, вероятно, влиянием глобальных климатических изменений.

На фоне естественных изменений стока отчетливо проявляется влияние антропогенных факторов, среди которых наиболее существенное значение имеет строительство ГЭС на крупнейших притоках Амура – реках Зея, Бурея и Сунгари. Менее выраженные воздействия оказывают малые водохранилища, противопаводковые и берегозащитные дамбы и другие гидротехнические сооружения. С середины 1990-х годов в бассейне Амура нарушилась цикличность внутригодовых и многолетних колебаний водности. Произошло общее уменьшение водности рек, обусловленное как естественными климатическими изменениями,

так и антропогенными факторами, на фоне которой наиболее заметно проявилось изменение неравномерности стока воды.

Наводнения в последний период высокой водности по сравнению с более ранними периодами стали более частыми, масштабными, продолжительными и разрушительными (Махинов и др., 2016). За десять лет (2013–2022 гг.) на Амуре четыре раза происходили очень большие наводнения, причем три из них в 2013, 2019 и 2021 годах оказались катастрофическими, наиболее масштабными за все время наблюдений. Они нанесли серьезный ущерб экономике региона и обернулись бедствием для населения.

На изменение водного режима реки Амур и его притоков несомненно оказывают влияние масштабные лесоразработки в ее бассейне, распашка земель, осушение болот, лесные пожары, роль которых в продолжительности, частоте и интенсивности атмосферных (муссонных) осадков и формировании критически больших наводнений остается пока еще слабо изученной.

Ухудшение качества воды. Важнейшей экологической проблемой остается состояние качества водных ресурсов реки Амур, формируемое как на территориях Китая, так и на российской части бассейна. Загрязнение воды происходит в условиях активного промышленного развития и сельскохозяйственного освоения новых, в том числе пойменных земель, значительная доля которого приходится на трансграничный перенос.

Загрязняющие вещества мигрируют, накапливаются в донных и пойменных отложениях, аккумулируются биообъектами (в том числе рыбой) и в отдельных случаях трансформируются до токсичных продуктов (Кондратьева, 2005). Большие масштабы загрязнения воды представляют значительную угрозу не только водной экосистеме среднего и нижнего течений реки Амур на протяжении 1300 км, но и оказывают негативное влияние на состояние прибрежных экосистем Японского и Охотского морей.

Значительный вклад в загрязнение вод реки Амур оказывает трансграничный перенос загрязняющих веществ из реки Сунгари. Вклад реки Сунгари в объем общего стока Амура составляет около 25%, а доля поступлений многих загрязняющих веществ по оценкам российских ученых достигает 70–80% (Шестеркина и др., 2020)

Значительное загрязнение воды реки Амур происходит не только вследствие отсутствия очистных сооружений или слабой эффективности их работы, но и вследствие частых техногенных аварий. Они в последние годы приводили к возникновению нескольких экологически опасных ситуаций, ставивших на грань риска обеспечение населения Приамурья качественной питьевой водой. Особенно опасной и тревожной была авария на химическом заводе в городе Цилинь в ноябре 2005 года, когда пришлось предпринимать неординарные мероприятия по нейтрализации ее последствий.

В реку Сунгари, а затем в Амур, поступило около 100 тонн нитробензола, бензола, анилина, ксилола, толуола. В пробах воды, отобранных в ходе российско-китайского мониторинга рек Сунгари и Амура весной 2006 года, было обнаружено значительное превышение предельно допустимых концентраций для рыбохозяйственных водоемов по полиароматическим углеводородам, хлорфенолам, пестицидам, тяжелым металлам. После этой аварии в бассейне Сунгари был зафиксирован еще ряд случаев значительного загрязнения рек и озер.

Таким образом, в настоящее время обширные территории в среднем и нижнем течениях Амура надежно не защищены от возможных негативных трансграничных воздействий опасных техногенных катастроф, последствия которых в силу географического положения наиболее существенны для российской территории.

Русловые процессы. Амур относится к рекам с высокой интенсивностью русловых переформирований. В настоящее время отмечается активизация русловых процессов, обусловленная усилением неравномерности стока воды и активной хозяйственной деятельностью в русле и на берегах, особенно в окрестностях крупных городов.

Эрозионно-аккумулятивные процессы проявляются в интенсивном размыве берегов, появлении новых и расширении ранее действовавших рукавов, возникновении обширных кос

и островов. Особенно интенсивно преобразования русла происходят в большие паводки на участках многофакторного хозяйственного воздействия на русло рек. Такие участки реки Амур с явно выраженными негативно направленными русловыми процессами находятся в окрестностях Благовещенска, Хабаровска, Комсомольска-на-Амуре, Амурска, что создает сложности для судоходства и устойчивой работы городских водозаборов.

Большие наводнения активизируют не только деформацию русел рек и размыв берегов, но и увеличивают риски проявления других опасных природных процессов на склонах речных долин, в частности, обвалов, оползней, селевых потоков.

Поэтому весьма актуальной является организация регулярного мониторинга русловых процессов на основе специальных наблюдений за динамикой речных русел и берегов на наиболее динамичных, в том числе пограничных участках рек Амура и Уссури. В связи с этим становится актуальной необходимость разработки согласованной с китайской стороной программы возведения берегозащитных и иных руслостабилизирующих мероприятий на пограничных участках рек, подверженных интенсивным русловым деформациям.

Следует отметить, что до настоящего времени влияние негативных трансграничных воздействий на гидрологический режим Амура должным образом не оценено. В последние десятилетия в китайской части бассейна проведено масштабное осушение болот на равнине Саньцзян, построено множество малых водохранилищ для орошения земель, что ухудшает водный режим одного из основных притоков Амура - реки Сунгари. Таким образом, трансграничное воздействие влияет не только на качество воды, но и на изменение речного стока, что не всегда учитывается при рассмотрении экологических проблем реки Амур.

Для обеспечения устойчивого социально-экономического развития юга дальневосточного региона важное значение имеет комплексное решение водохозяйственных проблем, направленных на минимизацию негативного влияния изменений стока рек, сохранение качества воды с целью надежного и безопасного промышленного и питьевого водоснабжения, а также сохранение уникальных рыбных ресурсов бассейна Амура.

Эффективное управление водно-ресурсными системами должно учитывать не только особые природные условия формирования водных ресурсов региона, но и трансграничное положение амурского бассейна.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП ДВО РАН по федеральному проекту № 126031118637-5.

Список литературы:

Ганзей С.С. Трансграничные геосистемы юга Дальнего Востока России и северо-востока КНР // Владивосток: Дальнаука, 2004. 229 с.

Кондратьева Л.М. Экологический риск загрязнения водных экосистем. Владивосток: Дальнаука, 2005. 299 с.

Махинов А.Н., Завадский А.С., Ким В.И., Чернов А.В., Губарева Е.К. Изменение русла реки Амур после наводнения 2013 года // Изв. Русского геогр. об-ва. 2016. Т. 148. № 3. С. 46–61.

Махинов А.Н., Лю Шугуан, Ким В.И., Махинова А.Ф. Особенности больших наводнений на реке Амур в период высокой водности 2009-2021 гг. // Тихоокеанская география. 2023. № 1. С. 66–74.

Шестеркина Н.М., Шестеркин В.П., Таловская В.С., Ри Т.Д. Пространственно-временная изменчивость содержания растворенных форм микроэлементов в водах реки Амур // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 336–347.

УДК 556.5

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РИСКА ЗАБОЛЕВАНИЙ НАСЕЛЕНИЯ, ВЫЗВАННЫХ ИЗБЫТКОМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РЕЧНЫХ ВОДАХ

Мотовилов Ю.Г., Фащевская Т.Б.

Институт водных проблем РАН, *motol49@yandex.ru*

Аннотация. Выполнен сопряженный пространственный анализ зон загрязнения речных вод тяжелыми металлами в бассейне Нижнекамского водохранилища и данных о состоянии здоровья местного населения. Установлено, что зоны с высокой заболеваемостью расположены преимущественно в пределах выявленных территорий с повышенным содержанием тяжелых металлов в речных водах.

Ключевые слова: речной бассейн, тяжелые металлы, заболеваемость населения, сопряженный анализ.

Условия окружающей социальной и природной среды, существенно повышающие риск возникновения заболеваний и определяющие высокие показатели заболеваемости, получили название факторов риска. По данным Всемирной организации здравоохранения (The World ..., 2002) разнообразные факторы риска возникновения и развития заболеваний объединены в три обобщающие группы: образ жизни, качество медико-санитарной помощи и среда обитания. В пределах ограниченной территории при равнозначном влиянии социально-экономических условий состояние окружающей среды, и, в частности, качество водных ресурсов, является важным фактором, влияющим на уровень заболеваемости населения. Тяжесть последствий и анализ затрат по адаптации регионов к условиям проживания показывают актуальность мер по созданию методов прогнозирования социально-экономических последствий аномалий качества речных вод. При проведении таких исследований задействуются детерминистические и физико-статистические связи значений водно-ресурсных аномалий с показателями рисков негативных последствий состояния экосистем, здоровья населения, функционирования гидроэнергетики, водного транспорта, сельского хозяйства и др.

В работе предложена методика медико-экологических исследований, основанная на сопряженном анализе распределения выявленных в процессе математического моделирования зон загрязнения речных вод (на примере водотоков водосбора Нижнекамского водохранилища (НКВ)) и данных о состоянии здоровья населения, проживающего в регионе. Водосбор НКВ расположен в Южно-Уральском регионе России и имеет площадь 186 тыс. км². Значительная часть территории расположена в пределах Республики Башкортостан (РБ). Водосбор характеризуется высокими концентрациями тяжелых металлов (ТМ) в природных водах из-за значительного содержания рудообразующих элементов в горных породах.

Математическая модель ECOMAG-HM. Для описания круговорота ТМ в речном бассейне (на его поверхности, в почве, грунтовых и речных водах) применена полураспределенная физически обоснованная модель ECOMAG-HM (Motovilov, Fashchevskaya, 2019), состоящая из двух основных блоков: гидрологической модели формирования стока и гидрохимической модели миграции и трансформации загрязняющих веществ (ЗВ). Первая модель описывает процессы гидрологического цикла: формирование снежного покрова и снеготаяние, промерзание и оттаивание почвогрунтов, инфильтрацию талых и дождевых вод в почву, испарение, динамику влажности почвы, формирование поверхностного, подповерхностного, грунтового и речного стока. Испытания этого блока модели выполнены на примере крупнейших речных бассейнов мира (Волги, Лены, Амура, Маккензи и др.), расположенных в различных физико-географических зонах с разными условиями формирования стока, типами питания и гидрологического режима водных объектов (Мотовилов, Гельфан, 2018).

Гидрохимическая модель описывает процессы миграции консервативных ЗВ в речном бассейне: их аккумуляцию на поверхности речного бассейна и растворение талыми и дождевыми водами, просачивание растворенных ЗВ в почву, взаимодействие с почвенным раствором и твердой фазой почвы. Миграция растворенных ЗВ в речном бассейне зависит от интенсивности гидрологических процессов. Поэтому, гидрологические характеристики, определяемые в гидрологической модели, используются как входы для гидрохимической модели. Также в модели учитывается поступление ЗВ от точечных источников. Уравнения, алгоритмы и результаты испытания этого блока модели описаны в работе (Motovilov, Fashchevskaya, 2019).

Для проведения расчетов и задания граничных условий для гидрологической модели в виде ежедневных полей метеорологических характеристик (температуры и влажности воздуха, осадков) в бассейне НКВ задействовано 56 метеостанций. Данные о ежедневных расходах воды на пяти гидрологических постах использованы для калибровки параметров и валидации гидрологического блока модели.

Начальные условия в гидрохимическом блоке модели по концентрации металлов (меди, цинка и марганца) в почвах водосбора НКВ задавались на основе приведенных в Атласе (Атлас..., 2005) карт содержания микроэлементов в пахотном слое почв на территории РБ. В качестве информации о точечных антропогенных источниках загрязнения речных вод задавались данные о сбросах металлов со сточными водами в населенных пунктах в бассейне р. Белой на основе форм статистической отчетности 2-ТП (водхоз). Для калибровки параметров и проверки гидрохимической модели использовались многолетние данные о концентрациях в речных водах меди, цинка и марганца, измеренных в 34-х гидрохимических створах Росгидромета на р. Белой и ее притоках. Как правило, измерения содержания металлов в речной воде проводились раз в месяц.

На основании исследований пространственно-временных закономерностей формирования водного и химического стока тяжелых металлов на водосборе НКВ с использованием программного комплекса ECOMAG-НМ:

- результаты расчетов гидрологических и гидрохимических характеристик сопоставлены с данными гидрохимического мониторинга в створах наблюдений;
- проведена оценка вклада природных и антропогенных составляющих в формирование гидрохимического стока ТМ;
- построены карты среднемноголетних модулей и концентраций ТМ в водотоках бассейна НКВ, в том числе на участках рек, не охваченных гидрохимическими наблюдениями.

Показатели здоровья населения. Для оценки состояния здоровья населения анализировались следующие показатели:

- общая заболеваемость на 1000 человек населения (зарегистрировано заболеваний у пациентов с диагнозом, установленным впервые в жизни);
- заболеваемость на 1000 человек населения по приоритетным классам болезней (новообразования; болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм; болезни органов пищеварения; болезни мочеполовой системы);
- заболеваемость детей в возрасте 0–14 лет и отдельно подростков в возрасте 15–17 лет по всем группам болезней по городским округам и муниципальным районам.

Сравнительная оценка уровня загрязнения водных объектов, протекающих в пределах субъектов РФ, полностью или частично расположенных на территории водосбора НКВ (а это кроме РБ – Оренбургская, Свердловская, Челябинская области, Пермский край, Удмуртская Республика и Республика Татарстан), показала, что главная река РБ – р. Белая по показателю индекса загрязненности воды УКИЗВ за период 2010–2017 гг. является наименее загрязненной по сравнению с соседними реками в других регионах. Однако по результатам математического моделирования гидрохимических характеристик в речной системе НКВ были выявлены устойчивые ареалы повышенного содержания в воде ТМ. К сожалению, из-за низкой

плотности мониторинговой сети эта картина лишь частично подтверждается данными гидрохимического мониторинга. Из полученных результатов следует, что внутри выделенных ареалов среднегодовое содержание в воде ТМ может многократно превышать нормативы, установленные для водоемов рыбохозяйственного значения. Несмотря на то, что такое содержание ТМ может не являться критичным для вод, использующихся для хозяйственно-питьевого водоснабжения, тем не менее, постоянное употребление такой воды и рыба, выловленная из этих рек, могут привести к накоплению металлов в организме человека и развитию целого ряда патологий (Моисеенко и др., 2010). Ареалы повышенного загрязнения водных объектов могут быть ассоциированы с территориями накопленного экологического ущерба, т.к. промышленное освоение водосбора р. Белой, начавшееся более 300 лет назад, заключалось в основном в разработке месторождений полезных ископаемых и осуществлялось без каких-либо экологических ограничений (в 18 веке в регионе действовали медеплавильные заводы, на долю которых в то время приходилось более 50% производства меди в России).

Результаты. Проведенный по материалам медицинской статистики сравнительный анализ уровней заболеваемости упомянутых выше субъектов России показывает (Регионы ..., 2018), что по уровню общей заболеваемости РБ и Челябинская область превышают средние показатели для Российской Федерации. Заболеваемость по приоритетным классам болезней населения в исследуемом регионе в ряде случаев также значительно выше среднего уровня для России. Так, по болезням крови, кроветворных органов и нарушениям, связанным с иммунным механизмом, заболеваемость в РБ на протяжении периода с 2005 г. по 2017 г. почти в 2 раза превышает средний уровень по стране. По болезням органов пищеварения и мочеполовой системы в РБ также отмечается повышенный уровень заболеваемости.

Для более детального анализа влияния загрязненных металлами речных вод на здоровье населения нами были рассмотрены данные статистики по общей заболеваемости в разрезе районного деления территории для трех возрастных групп: взрослого населения, детей в возрасте до 14 лет и подростков от 14 до 18 лет (Здравоохранение..., 2019). Взрослое население, проживающее на территории исследуемого речного бассейна, также испытывает на себе дополнительное влияние вредных привычек и воздействие вредных веществ, участвуя непосредственно в процессе промышленного производства. Наиболее подходящим объектом исследования является заболеваемость детского и подросткового населения. Дети и подростки проживают на данной территории постоянно, не соприкасаясь непосредственно с вредным для здоровья производством, они не имеют ранее приобретенных профессиональных заболеваний и ведут сравнительно здоровый образ жизни, что исключает влияние дополнительных вредных факторов (переедание, курение, алкоголь), повышающих риск развития многих заболеваний. Техногенное воздействие на здоровье детского населения проявляется опосредовано, через воздух, загрязненный токсичными выбросами, воду и продукты питания местного производства.

Сопряженный анализ распределения выявленных в процессе математического моделирования участков повышенного загрязнения в речном бассейне и данных о состоянии здоровья населения для трех возрастных групп в разрезе муниципального и районного деления показал (Fashchevskaja, Motovilov, 2021), что в пределах ареалов повышенного содержания ТМ в речных водах средняя заболеваемость населения выше, чем за пределами ареалов (рис. 1). При этом чем старше возрастная группа сравнения, тем выше процент роста заболеваемости (от 6.7% для детей до 9.5% для взрослых). Обращает на себя внимание факт почти в два раза большей заболеваемости у детей, чем у взрослых, что, по-видимому, объясняется более бережным отношением родителей к здоровью своих детей, нежели к своему. Следует отметить, что внутри ареалов находятся также административные единицы районного масштаба с низкими уровнями заболеваемости в районе г. Уфы. Одной из причин этого может являться доступность для населения этих районов более квалифицированной столичной медико-санитарной помощи. Конечно, было бы более уместно анализировать данные по классам болезней, в наибольшей степени обусловленных воздействием на организм

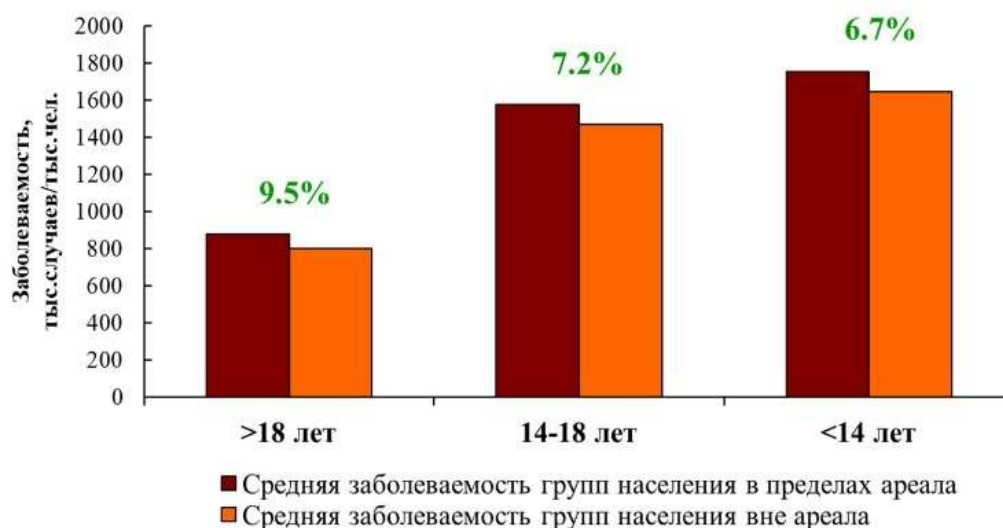


Рис. 1. Заболеваемость населения для трех возрастных групп в разрезе районного деления на территории бассейна НКВ

загрязненной ТМ воды. К сожалению, на данном этапе такие статистические данные в разрезе районного и муниципального деления не были предоставлены, и поэтому более детальный анализ и выявление корреляционных связей возможны на последующих этапах исследования.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВП РАН по теме FMWZ-2025-0003

Список литературы:

Атлас Республики Башкортостан. Уфа: Китап, 2005. 428 с.

Здравоохранение в Республике Башкортостан: статистический сборник. Башкортостан. Уфа, 2019. 129 с.

Моисеенко Т.И., Мегорский В.В., Гашкина Н.А., Кудрявцева Л.П. Влияние загрязнения вод на здоровье населения индустриального региона Севера // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 199–208.

Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд. Российской академии наук, 2018. 300 с. DOI: 10.31857/S9785907036222000001

Регионы России. Социально-экономические показатели. 2018. Статистический сборник. М., Росстат, 2018. 1162 с.

Fashchevskaya T., Motovilov Yu. Risk assessment mapping of diseases caused by excess heavy metals in river water // EGU General Assembly 2021, EGU21-2710. DOI: [10.5194/egusphere-egu21-2710](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2710).

Motovilov Yu.G., Fashchevskaya T.B. Simulation of spatially-distributed copper pollution in a large river basin using the ECOMAG-HM model // Hydrological Sciences Journal, 2019. Vol. 64. No. 6. P. 739–756. DOI: [10.1080/02626667.2019.1596273](https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1596273)

The World health report: 2002: Reducing risks, promoting healthy life. World Health Organization, 2002. 248 p.

УДК: 556.31:502.7

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТОК В ТРАНСГРАНИЧНОМ БАСЕЙНЕ РЕКИ ИРТЫШ: РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ УЧЕТА ЭКОСИСТЕМНЫХ ПОТРЕБНОСТЕЙ ПРИ ВОДОДЕЛЕНИИ

Никитина О.И., Косолапов А.Е.

Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (РосНИИВХ), г. Москва – Ростов-на-Дону, Россия, *oxana.niki@yandex.ru*

Аннотация. В трансграничном бассейне реки Иртыш отсутствуют согласованные механизмы водodelения с учетом экосистемных потребностей. В этой связи в данной работе экологический сток рассматривается как базовый инструмент учета экосистемных потребностей. Представлены принципы определения его предварительных объемов для приграничного российско-казахстанского участка р. Иртыш.

Ключевые слова: река Иртыш, трансграничный бассейн, водodelение, экосистемные потребности, экологический сток.

В трансграничном бассейне реки Иртыш отсутствуют согласованные механизмы водodelения, устанавливающие количественные параметры распределения стока. Рост водопотребления и влияние климатических изменений усиливают риски деградации водных и прибрежных экосистем и обуславливают необходимость разработки научно обоснованных рекомендаций по распределению стока с учетом экосистемных потребностей. В мировой практике одним из ключевых инструментов учета экосистемных требований при распределении водных ресурсов является экологический сток (Руководство..., 2022; Arthington et al., 2018).

В условиях высокой антропогенной трансформации и значимой социально-экономической и экологической роли приграничного российско-казахстанского участка реки Иртыш обоснование экологического стока, адаптированного к современным условиям, является основой для возможного учета экосистемных потребностей при разработке рекомендаций по водodelению. Особая значимость экологического стока обусловлена сохранением высокой экологической ценности пойменных экосистем среднего течения реки (Баженова и др., 2024; Бурлибаев и др., 2013) и ключевой ролью Иртыша в водоснабжении Омска и Омской области (Винокуров и др., 2025).

Учитывая текущее состояние экосистем бассейна р. Иртыш и высокую степень антропогенной трансформации, основными задачами реализации экологического стока на данном участке являются: резервирование части стока для обеспечения экосистемных потребностей, поддержание функционирования ценных пойменных экосистем и сохранение способности реки к самоочищению.

Для анализа изменений водного режима р. Иртыш и определения ориентиров допустимого изъятия стока использована многолетняя гидрологическая информация по основным постам на участке от верхнего течения до российско-казахстанского приграничного участка. Обработка данных включала анализ среднемесячных, сезонных и годовых расходов воды, а также приведение характеристик стока к расчетным створам на территории России (р. Иртыш – г. Омск, с. Татарка), Казахстана (р. Иртыш – ГЭС Усть-Каменогорская) и Китая (р. Черный Иртыш – с. Буран). Оценка экологического стока выполнена для пограничного створа р. Иртыш – с. Татарка.

Первичная оценка экологического стока выполнена с применением метода критических гидрологических условий (Дубинина и др., 2009). Основным индикатором критических условий выбрано обводнение поймы, отражающее состояние водных и околотоводных экосистем. Расчеты адаптированы к условиям бесприточности рассматриваемого участка и масштабного регулирования стока, включая влияние Верхне-

Иртышского каскада ГЭС (Бейсембаева и др., 2018; Правила использования..., 2001). Учет пространственных особенностей и гидрологической согласованности стока между створами позволил более точно оценивать экологически допустимые объемы изъятия воды.

Анализ маловодных лет и лимитирующих периодов позволил определить критические условия функционирования пойменных экосистем и установить ориентировочный объем экологического стока для приграничного участка – около 80% от естественного годового стока. При разработке рекомендаций учтены различия между условно-естественным (1923–1961 гг.) и современным периодом регулирования стока (1968–2022 гг.), что важно для корректного отражения изменений внутригодового стока и адаптации режима условно-экологического стока к современным условиям. Особое внимание уделено многоводному периоду (апрель–август), ключевому для затопления поймы, формирования нерестилищ и воспроизводства гидробионтов.

Предлагаемый режим экологического стока направлен на учет ключевых экосистемных потребностей и создает основу для разработки научно обоснованных рекомендаций по трансграничному водodelению, способствуя экосистемно обоснованному управлению водными ресурсами бассейна Иртыша.

Список литературы:

Баженова О.П., Костерова В.В., Адам А.М. Трансграничная река Иртыш как источник экосистемных услуг // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16. № 6. С. 103–126. – DOI 10.12731/2658-6649-2024-16-6-1015.

Бейсембаева М.А., Дубровская Л.И., Земцов В.А. Антропогенные изменения водных ресурсов и максимальных уровней реки Иртыш в равнинной части бассейна в Республике Казахстан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 3. С. 6–15.

Бурлибаев М.Ж., Куц С.И., Шенбергер И.В., Бурлибаева Д.М. Анализ влияния весенних попусков реки Ертис (Иртыш) на обводнение ее поймы // *Гидрометеорология и экология*. 2013. №4 (71). С. 68–80.

Винокуров Е., Ахунбаев А., Чуев С., Адахаев А., Сарсембеков Т. Бассейн реки Иртыш: трансграничные вызовы и практические решения. Доклад 25/2. Алматы: Евразийский банк развития, 2025. 57 с.

Дубинина В.Г., Косолапов А.Е., Коронкевич Н.И., Чебанов М.С., Скачедуб Е.А. Методические подходы к экологическому нормированию безвозвратного изъятия речного стока и установлению экологического стока (попуска) // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2009. № 3. С. 26–61.

Правила использования водных ресурсов Верхне-Иртышского каскада водохранилищ / Министерство энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан, Казгидропроект, Казгидро. – Алматы: 2001. 63 с.

Руководство по распределению водных ресурсов в трансграничном контексте. ЕЭК ООН: Женева, 2022. 204 с.

Arthington A.H., Bhaduri A., Bunn S.E., Jackson S.E., Tharme R.E., Tickner D., Young B., Acreman M., Baker N., Capon S., Horne A.C., Kendy E., McClain M.E., Poff N.L.R., Richter B.D., Ward S. The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows // *Frontiers in Environmental Science*. 2018. Vol. 6. 15 p. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00045.

УДК 626.822

СБРОСНЫЕ ВОДОЕМЫ АРИДНОЙ ТЕРРИТОРИИ ЕВРАЗИИ

Новикова Н.М.¹, Уланова С.С.^{1,2}, Мамутов Н.К.³

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, *nmnovikova@gmail.com*

²Институт комплексных исследований аридных территорий, Элиста, Россия

³Каракалпакский государственный университет им. Бердаха, Нукус, Каракалпакия, Узбекистан

Аннотация. Рассмотрены причины и условия формирования водоемов-накопителей вод ирригационного стока в аридных районах бывшего СССР – обширной бессточной области земного шара. Дан обзор исследований, накопленной гидролого-гидрохимической информации о коллекторно-дренажном стоке с орошаемых земель с 1990-х годов по настоящее время. По опубликованным данным охарактеризован ряд наиболее исследованных водоемов пустынной зоны России, Узбекистана и Казахстана, расположенных в бессточных районах Прикаспийской низменности, в бассейнах рек Амударья и Сырдарья. Обсуждаются вопросы возможного использования вод, скапливающихся в сбросных водоемах.

Ключевые слова: аридные территории, ирригационные системы, сбросные, коллекторно-дренажные воды, водоемы, минерализация, объем, уровень, изменение, использование

«Сбросные водоемы» – это водоемы-накопители сбросных вод и вод коллекторно-дренажного стока. Их, по аналогии с водохранилищами при ГЭС (Авакян, Лебедева, 2002), можно назвать «феноменом XX века». Строительство водохранилищ ирригационного назначения в XX веке в аридных районах создало условия для освоения под орошение обширных новых площадей и обусловило формирование больших объемов ирригационного стока с орошаемых полей. Отвод отработанных вод за пределы оазисов в естественные понижения способствовал образованию водоемов нового типа – накопителей дренажного стока. В то же время по мнению А. М. Никитина (1987), воды коллекторно-дренажного стока сбрасываются практически все озера на равнинной территории Средней Азии и накапливаются там. В. М. Санин, первым начавший комплексное изучение сбросных водоемов (Санин, 1989; Санин и др. 1991), считает, что все водоемы Средней Азии, располагающиеся на равнинных территориях на высоте ниже 500 м над у.м., в зоне аккумуляции стока, – представляют собой сбросные водоемы. По его подсчетам (Санин, 1989) в середине 1990-х годов в степных и пустынных районах СССР в бассейнах Черного, Азовского, Каспийского, Аральского морей и Балхаш-Алакольского, Центрально-Казахстанского, Обь-Иртышского бессточных бассейнов, площадь орошаемых земель была выше 20 млн. га, ежегодный водозабор – 200-210 км³ воды, среднегодовой объем возвратных вод составлял 81.3 км³/год, коллекторно-дренажные воды в их составе – 40 км³/год. Возвратные воды с минерализацией менее 3 г/л преобладали и составляли 54% от общего объема, 3–5 г/л – 22%, более 5 г/л – 24%. Наибольшие объемы возвратных вод, составляющие более 60% от всей суммы формирующихся на территории СССР, в том числе 33.9 км³/год коллекторно-дренажных вод, приходилось на Аральский бассейн. На втором месте был бассейн Каспийского моря, где, в основном, в бассейне Куры формировалось 15.9 км³/год возвратных вод и в их составе 4.96 км³/год – дренажно-коллекторных. На третьем месте был бассейн Азовского моря, где возвратные и коллекторно-дренажные воды составляли соответственно 5.4 и 1.8 км³/год. В те годы на долю Российской Федерации приходилось около 13 км³/год возвратных вод и более 3 км³/год коллекторно-дренажных. При этом на европейскую часть России, включая бассейны малых рек и ряд бессточных районов, приходилось около 11 км³/год возвратных и почти весь (около 3 км³/год) коллекторно-дренажный сток. В Обь-Иртышском бассейне водоотведение было незначительным: 1.5 км³/год возвратных и 0.18 км³/год – коллекторно-дренажных.

Информация о количестве водоемов – накопителей ирригационного стока имеется только для Аральского бассейна на 1990-е годы. В. М. Санин с соавторами (1991) здесь насчитали 2341 водоем с общей площадью водного зеркала 7065.9 км². Около 95% сбросных водоемов от их общего числа относилось к категории очень малые, с площадью менее 1 км². Крупные водоемы, числом около 20, имели площадь более 10 км² каждое, а суммарный объем их вод оценивался в 40–45 км³. Большинство водоемов бессточные, не используются и единственная их расходная часть – испарение. Минерализация воды – от 2–3 до 15 г/л. (Никитин, 1985, 1987). Запас солей в этих водоемах оценивался в 600–650 млн. т (Санин и др., 1991).

В период 1990–1999 гг. в бассейне Аральского моря суммарный объем коллекторно-дренажного стока колебался от 28 до 33.5 км³/год. Около 13.5–15.5 км³ ежегодно формировалось в бассейне Сырдарьи и 16–19 км³ – в бассейне Амударьи. За десятилетие 2000–2009 гг. суммарный объем коллекторно-дренажных вод в среднем составлял около 30 км³/год, что свидетельствовало о его незначительном уменьшении. От 46 до 51% от общего объема вод отводилось по коллекторам в реки; на орошение – от 3 до 16%, остальная часть дренажных вод, примерно 50%, отводится – в понижения за пределами оазисов. Наибольшие объемы дренажных вод регистрируются в Республике Каракалпакстан, Ферганской долине, Хорезмской, Сырдарьинской и Бухарской областях.

В низовьях Амударьи, на территории Каракалпакии, дренажные воды наполняют специально созданные водоемы, перехватывающие поступление их в море. На западе, на левом берегу Амударьи под чинком Устюрта расположен водоем Судочье, на правом берегу у подножья возвышенности Бельтау, на границе с песками Кызылкум – водоем Каратерень, и в бывшем морском заливе – водоем Жилтырбас, (табл. 1).

Таблица 1. Основные характеристики сбросных водоемов, расположенных на окраине дельты реки Амударьи (Курбанбаев и др., 2023).

Наименование	Площадь, тыс. га	Потребный объем водозабора, млн м ³	Отметка, м	
			Н _{макс.}	Н _{мин.}
Судочье	44.0	650.0	52.7	52.1
Каратерень	18.0	234	52.0	52.4
Жилтырбас	28.5	477	52.1	49.2

Объем формирующихся коллекторно-дренажных вод в дельте различается по годам и зависит от водности года и притока Амударьинской воды, поэтому запасы воды в сбросных водоемах, их уровни и площадь водной поверхности в разы отличаются в разные годы. Большая часть дренажных вод формируется и пополняет сбросные водоемы в весенний и летний периоды (Якубов и др., 2011).

Гидрохимический режим собственно сбросных водоемов аридных территорий Евразии систематически не изучается. Многолетние исследования Э. И. Чембарисова (Чембарисов, Бахритдинов, 1984; Чембарисов и др., 2018) в бассейне Аральского моря проводились в основном по изучению минерализации и химического состава вод рек Амударьи и Сырдарьи, коллекторно-дренажных вод и оценке их пригодности для повторного использования. Исследования показали, что коллекторно-дренажные воды, формирующиеся в бассейне Аральского моря, пригодны на орошение и промывку земель в соответствующих почвенно-мелиоративных условиях всех водохозяйственных районов Аральского бассейна в связи с отсутствием опасности осолонцевания земель. Показателем этой их особенности служит высокое содержание кальция (50–60% от суммы солей) в почвах Центральной Азии.

Озеро Сарыкамыш и система Арнасайских водоемов – самые крупные из существующих в настоящее время сбросных водоемов в бассейне Аральского моря и на территории Евразии. Они образовались в результате наполнения водой некогда сухих солончаковых впадин. При этом в Арнасай поступает также и сырдарьинская вода во время прохождения высоких паводков. В Сарыкамыш поступают только дренажные воды.

М. В. Санин с коллегами, непосредственно исследовавший озеро Сарыкамыш в 1990-е годы (Санин и др., 1991), и по литературным источникам – историю его длительного существования, показал, что наиболее типичные особенности сбросных водоемов – нестабильность их существования и изменчивость гидролого-гидрохимических характеристик. После наполнения понижения дренажными водами, возникновения солончатоводной экосистемы, пригодной для использования в рыбохозяйственных целях, естественная эволюция водоема в аридных условиях приводит к заполнению наносами, осолонению воды, обеднению видового состава рыб и потере хозяйственного значения. Такие водоемы периодически обсыхают и при новом наполнении цикл развития водоема и старения, повторяется. Авторы обращают внимание на то, что дренажные воды загрязнены пестицидами, минеральными удобрениями и другими вредными для человека веществами, что ограничивает возможность их использования.

Сбросные водоемы, созданные на европейской территории России, связаны с орошением, развивающемся в пустынных районах Республики Калмыкия на привлеченном стоке рек Волга, Терек, Кума (Уланова, 2010; Уланова и др., 2026). Три водоема (Маньч-Гудило, Цаган-Нур и Деед-Хулсун) накапливают сбросные и коллекторно-дренажные воды, поступающие с обводнительно-оросительных систем (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика сбросных водоемов на территории Калмыкии.

Характеристика	Водоем		
	Маньч-Гудило	Цаган-Нур	Деед-Хулсун
Год создания	1952	1978-1979	1975
Питание водоема, ООС	Правоегорлыкская	Сарпинская	Черноземельская
Геоморфологический район	Маньчская ложбина	Сарпинская ложбина	Даванская ложбина
Объем при НПУ, км ³	2.07	0.08-0.09	0.02
Площадь зеркала, км ²	790	61.5	16
Наибольшая длина, км	150	45	8
Наибольшая ширина, км	11	1.5	2.5
Средняя глубина, м	2.6	1.5	2.0
Использование*	КДВ, биосф. зап.	КДВ, И, Рп, С, зак. фед.	КДВ, Рп, И, зак. респ.
Минерализация воды**, г/л	10.5/45.2	18.7/32.0	9.1/12.9

* В – питьевое и хозяйственное водоснабжение, И – орошение, КДВ – прием сбросных вод, Рп – любительское рыболовство, Рп – промышленное рыбоводство, С – водопой скота, О – отдых, Зап. – заповедник, Зак. – заказник.

** среднее многолетнее значение в приплотинной части (2001–2023 гг.): в числителе – весной, в знаменателе – осенью.

Эти водоемы, как и рассмотренные выше в бассейне Аральского моря, функционируют нестабильно: площадь водного зеркала, минерализация, изменяются в разы в течение года (от весны к осени) и по годам в связи с нестабильностью поступления питающих их вод, и осолоняются со временем. Эти водоемы, несмотря на относительно высокую минерализацию, имеют важное природоохранное значение в масштабе СЗ Прикаспия и объявлены заповедниками и заказниками. При поддержании оптимального уровня, они длительное время могут сохранять свои природоохранительные функции.

Изучение мнения исследователей и экспертов относительно перспективы существования и использования вод сбросных водоемов, показывает, что отношение к этому вопросу меняется со временем. С ростом площади орошаемых земель и объемов ирригационного стока все большие объемы коллекторно-дренажных вод стали отводить не в реки, а за пределы оазисов. Со временем все больше экспертов приходят к мнению, что в низовьях рек необходимо создавать различные по объему сбросные водоемы (Чимбарисов и

др., 2018), концентрирующие воды коллекторно-дренажного стока с целью дальнейшего их использования, в том числе и для орошения.

Длительное время считалось, что в бассейне Аральского моря излишний сток любой ценой нужно направлять в море, но в последние годы признана необходимость предусмотреть все возможные варианты по его удержанию в водоемах, чтобы эта вода использовалась для повышения продуктивности этих водоемов (рыба, ондатра, тростник и др.) и тем самым хотя бы частично восстановить природные богатства этого региона (Якубов и др., 2011).

Работа выполнена в рамках темы Госзадания Института водных проблем РАН № FMWZ-2025-0002.

Список литературы:

- Курбанбаев С., Каримова О., Калимбетов И., Каипов М. Водный режим озер Приаралья и основные морфометрические характеристики Междуреченского водохранилища // Центральноазиатский журнал теоретических и прикладных исследований. 2023. Т. 4. № 1. С. 128–132.
- Никитин А.М. Динамика водных ресурсов равнинных озер Средней Азии// Проблемы исследования крупных озер. Л.: Наука. 1985. С. 299–303.
- Никитин А.М. Озера Средней Азии (Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР). Л.: Гидрометеиздат, 1987. 105 с.
- Санин М.В. Водоемы-накопители коллекторно-дренажных вод в бассейне Аральского моря // Мелиорация и водное хозяйство. 1989. № 11. С. 2-6.
- Санин М.В., Костюковский В.И., Шапоренко С.И. и др. Озеро Сарыкамыш и водоемы-накопители коллекторно-дренажных вод. М.: Наука, 1991. 150 с.
- Уланова С.С. Эколого-географическая оценка искусственных водоемов Калмыкии и экотонных систем «вода-суша» на их побережьях. М.: РАСХН, 2010. 263 с.
- Уланова СС, Новикова НМ, Шаповалова ИБ. Волкова НА. Биоразнообразие ООПТ водоемов-накопителей вод коллекторно-дренажного стока в Республике Калмыкия// Аридные экосистемы. 2026. Т. 32. № 1 (106). С. 126–140.
- Чембарисов Э.И., Бахритдинов Б.А. Особенности влияния орошения на минерализацию речных вод бассейна Амударьи. Нукус: Каракапакстан, 1984. 144 с.
- Чембарисов Э.И., Мирзакобулов Ж.Б., Ананова К.К. Коллекторно-дренажные воды среднего течения бассейна р. Сырдарьи// Водные ресурсы и водопользование (Узбекистан). 2018. № 1(168). С. 36–39.
- Якубов Х.Э., Якубов М.А., Якубов Ш.Х. Коллекторно-дренажный сток Центральной Азии и оценка его использования на орошение. Принт. Институт водн. пробл. АН РУз., НИЦ МКВК. Ташкент. 2011. 279 с.

УДК 626.81

ПРИРОДНО-ХОЗЯЙСТВЕННАЯ СТРУКТУРА БАСЕЙНА Р. УРАЛ: ПРОБЛЕМЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

Падалко Ю.А.

Институт степи УрО РАН, Оренбург, Россия, yuryap@mail.ru

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ хозяйственной освоенности и экологических рисков бассейна реки Урал. Особое внимание уделено изучению экстремальных гидрологических ситуаций, возникающих в период весеннего половодья, а также оценке их последствий для населения и хозяйственных объектов региона.

Ключевые слова: закономерности расселения, устойчивость системы расселения, водосбор, бассейн р. Урал, затопления и подтопления.

Трансграничный бассейн реки Урал охватывает территорию трех субъектов Российской Федерации и трех регионов Республики Казахстан, что обуславливает его особое геополитическое значение. Высокая степень индустриального и селитебного освоения данной территории существенно влияет на перспективы социально-экономического развития региона и специфику его международной интеграции в современных условиях.

Территория бассейна характеризуется активной добычей полезных ископаемых: в восточной части, представленной горной системой Южного Урала, осуществляется разработка рудных месторождений, а в западной части, расположенной на окраине Восточно-Европейской равнины, ведется добыча углеводородов. Такое комплексное освоение природных ресурсов и промышленное развитие определяет стратегическое значение бассейна реки Урал в системе межрегионального взаимодействия и международного сотрудничества.

Селитебное освоение на территории бассейна р. Урал имеет глубокую историю развития от пастбищных земель кочевых народов, древних очагов горнорудного производства и многоотраслевой промышленности. В настоящее время в российской части бассейна проживает 2.4 млн человек, более половины в крупных городах – Оренбург, Магнитогорск, Орск, Новотроицк, Сибай, Баймак, Учалы, Гай.

Целью работы является исследование природо-хозяйственной структуры бассейна р. Урал на основе анализа расселения населения и рисков воздействия неблагоприятных гидрологических процессов (подверженности населенных пунктов затоплению и подтоплению) на селитебные территории.

В работе использованы данные численности населения населенных пунктов по итогам проведенной Всероссийской переписи населения 2021 г. по Республике Башкортостан, Челябинской области и Оренбургской области. Сведения о подтопленных территориях за современный период от Территориального центра мониторинга и прогнозирования ЧС (ТЦМП ЧС) по Оренбургской области и Главного управления МЧС по Оренбургской области. Для анализа уровня режима р. Урал использовались максимальные годовые уровни реки по гидропосту Оренбург с 1940 по 2024 гг. из архивных данных гидрологических наблюдений Оренбургского ЦГМС – филиал ФГБУ «Приволжское УГМС».

Российская часть бассейна реки Урал по водосборной организации была разделена на 99 (векторный слой) – элементарных водосборов, притоков первого, второго, третьего и четвертого порядка с площадью не более 2 тыс. км², что соответствует водосбору малой реки.

Анализ распределения населения в бассейне реки Урал показывает, что территории с высокой плотностью расселения (более 20 человек на квадратный километр) локализованы в нескольких ключевых районах. К ним относятся левобережные притоки верхнего течения реки Урал в окрестностях города Учалы, бассейн реки Большой Юшатырь на территории Республики Башкортостан, а также левобережные водосборы реки Сакмара на участке от поселка Саракташ до города Оренбурга. В верхней части бассейна реки Урал сформировалась основная полоса расселения, протянувшаяся от города Учалы через Верхнеуральск,

Магнитогорск, Сибай до Баймака. В окрестностях этих населенных пунктов отмечается наиболее плотное размещение населения, при этом основная концентрация жителей наблюдается вблизи крупных горнопромышленных центров - городов Магнитогорска и Учалов.

Наряду с этим выявлены территории с низкой плотностью населения, которые приурочены к водосборам рек Большая Уртазымка, Большая Караганка и Суундук. Данные территории расположены в приграничных районах Оренбургской и Челябинской областей и охватывают пространство вплоть до верхней части водосбора Ириклинского водохранилища (рис. 1).

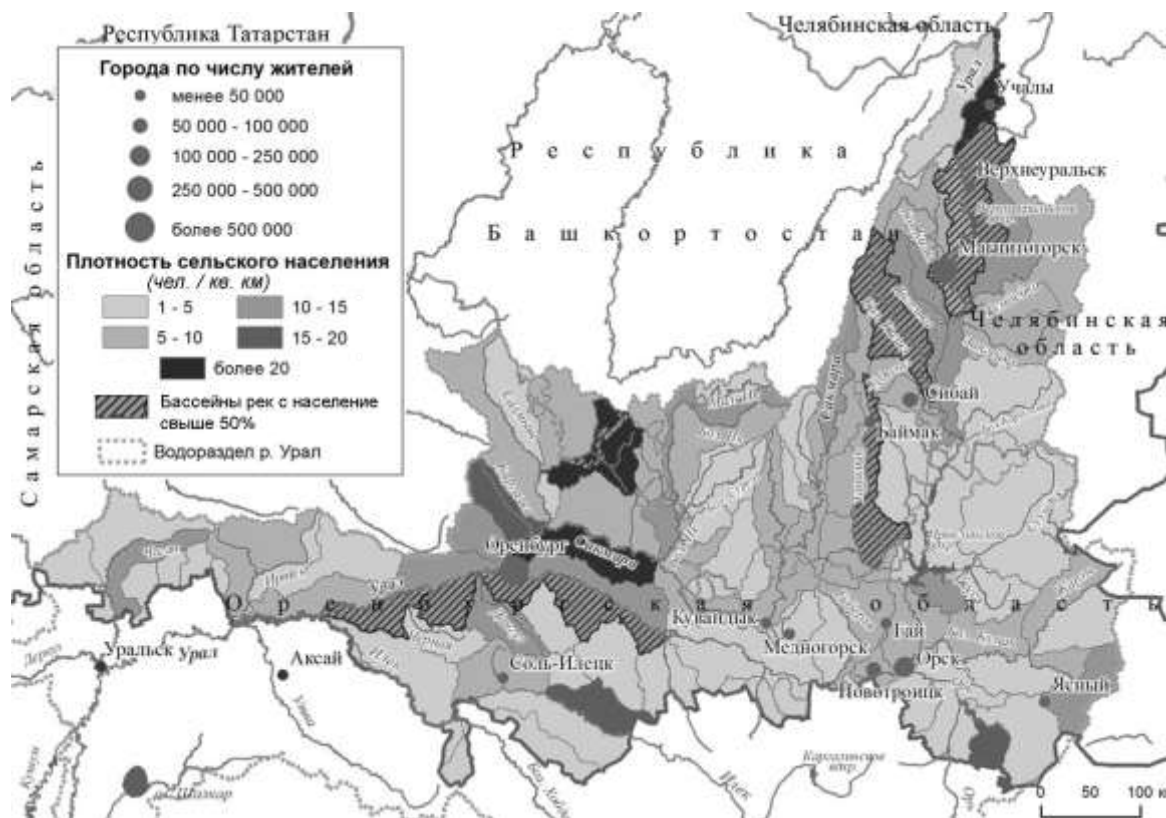


Рис. 1. Распределение населения по водосборам рек бассейна р. Урал

Более 400 населенных пунктов, находящихся под угрозой затопления, преимущественно сосредоточены на средних и малых притоках реки Урал. Данная территория характеризуется наличием степных водотоков в верхнем и среднем течении реки, где максимальный объем стока формируется в весенний период (Падалко, 2019).

Анализ территориального распределения населенных пунктов, подверженных риску затопления или подтопления, показывает, что 21% из них располагается в верхнем течении реки Урал и ее притоках, 38% - в среднем течении, а 41% приходится на нижнее течение водоема.

В российской части бассейна реки Урал насчитывается около 200 населенных пунктов, находящихся в зоне потенциального риска, включая четыре крупных города: Верхнеуральск, Магнитогорск, Орск и Оренбург. При этом общая численность населения, проживающего в зонах возможного затопления или подтопления, оценивается более чем в 20 тысяч человек.

Среди регионов российской части бассейна наибольшие негативные последствия от наводнений приходятся на Оренбургскую область. В результате прохождения половодья в Оренбургской области практически ежегодно подвергаются частичному затоплению (подтоплению) селитебные территории и временно нарушается транспортное сообщение районных центров с десятками населенных пунктов. В целом по Оренбургской области,

Челябинской области и Республике Башкортостан весеннее половодье часто наносит ущерб инфраструктурным объектам регионов и населенным пунктам.

Несмотря на риск затопления и подтопления, селитебное освоение пойменных территорий последние годы только возрастает. К примеру, территориальное развитие города Оренбурга сопровождалось постепенным освоением пойменных территорий (рис. 2). Современные тенденции показывают, что проблема наводнений остается актуальной. Несмотря на наличие гидротехнических сооружений и систем мониторинга, масштабы затопления в последние годы не уменьшаются. Особенно уязвимыми остаются территории садовых некоммерческих товариществ, где проживает значительное количество населения (Падалко, 2025).



Рис. 2. Динамика застройки затопляемой территории г. Оренбурга и максимальные уровни р. Урал (Данные по застройке: Публичная кадастровая карта <https://nspd.gov.ru/> (дата обращения 10.12.2025))

Таким образом указывают на необходимость комплексного подхода к решению проблемы. Требуется усиление мер по контролю за строительством в зонах возможного затопления, совершенствование системы прогнозирования паводков и повышение эффективности защитных сооружений. Важно также учитывать исторический опыт при планировании развития городской территории и разработке стратегий защиты от наводнений. В региональных схемах территориального планирования градостроительных планах необходимо проводить обязательную экспертизу проектов застройки территории и инфраструктурных сооружений с учетом гидрологических особенностей территории, а также стимулировать развития территорий вне зон возможного затопления.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме: «Геоэкологические основы и технологические аспекты оптимизации природопользования в степных регионах России и сопредельных территорий».

Список литературы:

Падалко Ю.А. Территориальные закономерности и устойчивость расселения населения на водосборах рек степного Заволжья и Южного Урала // Успехи современного естествознания. 2019. № 12. С. 116–121.

Падалко Ю.А. Наводнения на реке Урал: история, факторы, проблемы селитебного освоения (на примере города Оренбурга) // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 29 мая – 01 2025 года. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2025. С. 189–192.

УДК 628.31

ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОГО БАСЕЙНА ПОДЗЕМНЫХ ШАХТНЫХ ВОД И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Поляков Э.В.

Донецкий государственный научно-исследовательский угольный институт (ГБУ «Донуги»),
Донецк, ДНР, Российская Федерация, eduard.polakov@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме формирования единого бассейна подземных шахтных вод в горнодобывающих регионах. Рассмотрены факторы, влияющие на этот процесс, включая гидрогеологические связи между затопленными и действующими шахтами, а также естественный водоприток. Проанализированы перспективы использования шахтных вод как ценного ресурса для различных отраслей экономики, включая водоснабжение, орошение и геотермальную энергетику. Предложены подходы к рациональному управлению единым бассейном шахтных вод, направленные на минимизацию экологических рисков и создание новых экономических возможностей.

Ключевые слова: шахтные воды, гидрогеологический объект, геотермальная энергия, эффективные технологии

Интенсивная добыча угля в Донецком бассейне на протяжении нескольких столетий привела к формированию обширной системы подземных горных выработок, имеющих единую систему перетоков шахтных вод. Остаточная гидравлическая связь между закрытыми и действующими шахтами, а также естественный водоприток обусловили образование фактически единого бассейна, требующего комплексного подхода к управлению и использованию водного ресурса.

Значимость проблемы заключается в нескольких ключевых аспектах.

Во-первых, неконтролируемый подъем воды в затопленных шахтах создает риски загрязнения водоносных горизонтов и прилегающих территорий поверхности.

Во-вторых, возрастает опасность обрушения вмещающих пород горных выработок и деформации земной поверхности вследствие отсутствия мероприятий по безопасной остановке горных работ.

В-третьих, шахтные воды, обладая определенными химическими и температурными характеристиками, могут представлять ценный ресурс для различных отраслей экономики.

Перспективы использования шахтных вод включают водоснабжение промышленных предприятий и населенных пунктов, орошение сельскохозяйственных угодий, теплоснабжение (геотермальная энергетика), а также добычу ценных компонентов (редкие металлы, соли). Реализация данных направлений требует проведения комплексных исследований, разработки инновационных технологий подготовки и очистки воды, а также создания эффективной системы управления водными ресурсами вновь образующегося единого бассейна. Это позволит не только минимизировать экологические риски, но и создать новые экономические возможности для региона.

Целью работы по формированию единого бассейна подземных шахтных вод и перспективы использования водных ресурсов является разработка подхода к рациональному управлению этим комплексным гидрогеологическим объектом, учитывающего экологические, экономические и социальные аспекты. Достижение этой цели требует решения следующих задач:

Оценка гидрогеологических условий и формирование модели бассейна: Необходим детальный анализ геологического строения, гидрогеологических связей между шахтами, источников питания и разгрузки, а также физико-химического состава шахтных вод. Схема гидравлических связей Киевско-Куйбышевского районов города Донецк и города Макеевка (рис. 1) наглядно подтверждает наличие прямых связей между угледобывающими предприятиями Донецко-Макеевской агломерации, находящимися в стадии подготовки к

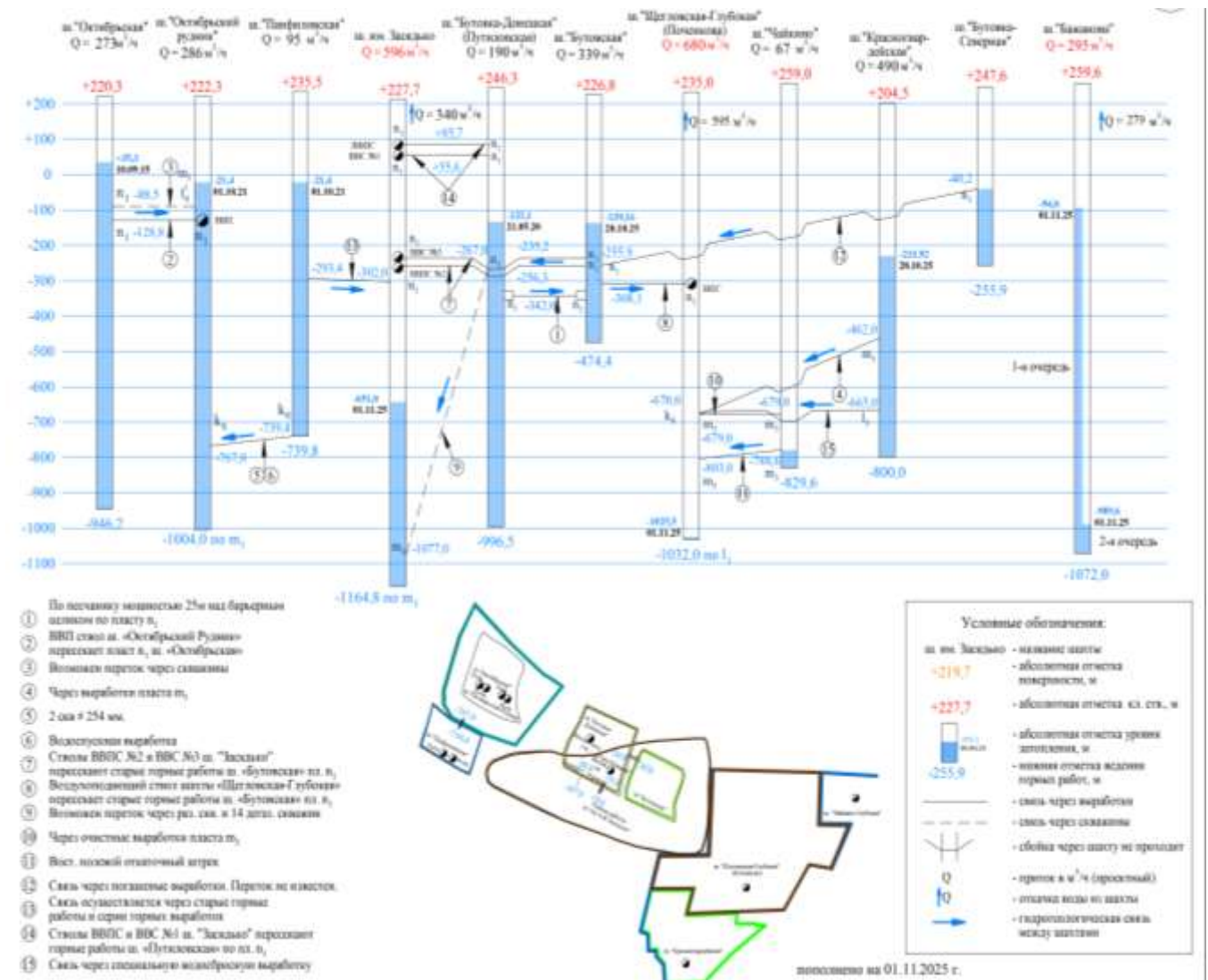


Рис. 1. Схема гидравлических связей по шахтам г. Донецка (Киевско-Куйбышевский район) и г. Макеевки

ликвидации. Соотношение объемов воды, выдаваемой на поверхность и продолжающих накапливаться в подземных горных выработках, указывает на возможность двукратного уменьшения сроков затопления и значительного роста объемов единого бассейна. На основе этих данных формируется математическая модель, позволяющая прогнозировать изменения в водном балансе бассейна.

Изучение потенциальных источников загрязнения: важно идентифицировать источники загрязнения шахтных вод (отходы добычи угля, промышленные стоки, сельскохозяйственные удобрения) и оценить их влияние на качество воды.

Разработка технологий подготовки и очистки шахтных вод: требуется адаптация существующих и разработка новых, экономически эффективных технологий для очистки шахтных вод до уровня, пригодного к использованию в различных целях.

Определение приоритетных направлений использования шахтных вод: необходимо провести анализ потребности в водных ресурсах в регионе и определить наиболее перспективные направления использования шахтных вод, учитывая их качество и количество.

Разработка стратегии управления единым бассейном шахтных вод: на основе полученных результатов формируется комплексная стратегия, включающая мероприятия по

мониторингу, очистке, использованию и охране шахтных вод, а также механизмы экономического стимулирования и нормативно-правового регулирования.

Реализация этих задач позволит создать эффективную систему управления водными ресурсами, минимизировать негативное воздействие затопленных шахт на окружающую среду и обеспечить устойчивое развитие региона.

Проблемой формирования единого бассейна подземных шахтных вод и исследованием перспективы использования водных ресурсов занимались отечественные ученые, среди которых особое место занимают работы ведущих специалистов Донецкого государственного научно-исследовательского угольного института (ГБУ «ДОНУГИ») – государственного бюджетного учреждения Донецкой Народной Республики. Их исследования заложили основу для понимания гидрогеологических процессов, происходящих в горнопромышленных регионах Донбасса, и выявили потенциал шахтных вод как ценного ресурса.

В своих исследованиях В. А. Низов освещает вопросы сохранения качества водных ресурсов, а также приводит типы сточных вод горно-обогачительных комбинатов (Низов, 2021). Ученый проводит глубокий анализ физико-химических превращений минеральной основы и подземных вод в условиях разработки месторождений, а также рассматривает варианты технологических схем кондиционирования шахтных вод.

В работе З. М. Шуленина, В. В. Багрова, А. В. Десятова приведен анализ условий образования и состояние техногенных кислых рудничных, подотвальных шахтных, а также сточных вод горно-металлургических и металлообрабатывающих предприятий, объемы, химический состав и экологическое воздействие на элементы окружающей среды, поверхностные и подземные водотоки, ландшафты, лесную и травянистую растительность, а также животный мир и человека (Шуленин и др., 2015). Рассматриваются методы очистки этих вод от растворенных в них металлов, дано описание технологических процессов обезвреживания вод с использованием обратного осмоса, электродиализа, различных видов флотации и что на сегодняшний день особо актуально, – приводят описание механизмов и аппаратное оформление процессов извлечения металлов из сбросных вод. Ученые предлагают методы очистки сточных вод с использованием сорбционно-электролизного способа с применением природных и искусственных сорбентов, при этом особое внимание уделено природным высококремнистым сорбентам, с экономическим обоснованием кислых и подотвальных вод, являющихся ценными источниками получения редких, черных и цветных металлов.

В своих трудах В. В. Помогаева приводит основные подходы комплексного использования водных объектов для водоснабжения населенного пункта и промышленного предприятия с оценкой состояния водных объектов, исходя из классических принципов составления водохозяйственного баланса, определения пригодности водоемов для различных целей водопользования, демографической емкости района застройки по водным ресурсам (Помогаева, 2022).

Однако, несмотря на значительный объем выполненных исследований, задача комплексного управления единым бассейном подземных шахтных вод остается актуальной. Требуется разработка новых эффективных технологий очистки и подготовки шахтных вод для различных целей, а также создание экономически обоснованных схем их использования. Кроме того, необходимо учитывать экологические риски, связанные с подъемом воды в затопленных шахтах и возможным загрязнением водоносных горизонтов.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к использованию шахтных вод в качестве геотермального источника энергии. Проведенные исследования показали перспективность применения тепловых насосов для отопления и горячего водоснабжения жилых и промышленных зданий. Реализация таких проектов позволит снизить зависимость от традиционных источников энергии и сократить выбросы парниковых газов.

Таким образом, дальнейшее изучение проблемы формирования единого бассейна подземных шахтных вод и разработки эффективных технологий их использования представляется важной научной и практической задачей, решение которой позволит не только

минимизировать экологические риски, но и создать новые экономические возможности для региона.

Список литературы:

Низов В. А. Кондиционирование шахтных вод. М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 164 с. / Цифровой образовательный ресурс IPR SMART. Режим доступа: <https://www.iprbookshop.ru/115130.html/> (дата обращения 14.01.2026).

Помогаева В. В. Комплексное использование водных объектов: учебно-методическое пособие. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2022. 87 с. / Цифровой образовательный ресурс IPR SMART. Режим доступа: <https://www.iprbookshop.ru/127232.html/> (дата обращения 21.01.2026).

Шуленина З. М., Багров В. В., Десятов А. В. [и др.]. Вода техногенная: проблемы, технологии, ресурсная ценность. М.: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2015. 408 с. / Цифровой образовательный ресурс IPR SMART. Режим доступа: <https://www.iprbookshop.ru/94753.html/> (дата обращения 18.01.2026).

УДК 502.17:528.9(62)

КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОЕКТА ОСВОЕНИЯ КАТТАРСКОЙ ВПАДИНЫ (ЕГИПЕТ): АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВЫГОД И ПРОБЛЕМНЫХ АСПЕКТОВ РЕАЛИЗАЦИИ

Рыбина Е.Ю.

ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Москва, Россия, *kateroubin@gmail.com*

Аннотация. Настоящее исследование предлагает комплексный геопространственный анализ проекта освоения Каттарской впадины (Египет). На основе ГИС-технологий проведена комплексная оценка проекта освоения Каттарской впадины в Египте. Оценены ключевые параметры проекта, включая энергетический потенциал и объемы водных ресурсов, возможность реализации проекта и экологические риски.

Ключевые слова: ГИС-технологии, Каттарская впадина, геопространственный анализ

Каттарская впадина расположена на северо-западе Египта, в Ливийской пустыне, примерно в 300 км к западу от Каира и в 76 км к югу от побережья Средиземного моря. Самая низкая точка впадины находится на уровне –133 м ниже уровня моря. Климат гипераридный, экстремально засушливый. Годовая сумма осадков составляет менее 25 мм в год. Наиболее увлажненным является период с января по март (Elsayed, 2019).

В XX веке учеными активно прорабатывались проекты заполнения Каттарской впадины водами Средиземного моря. Были предложены различные способы заполнения впадины, в том числе строительство канала, прокладка трубопроводов, использование контролируемых направленных ядерных взрывов (Bassler, 1972, Ball 1933). В результате должен был сформироваться крупный водный объект – водохранилище, эксплуатация которого позволила бы вырабатывать существенный объем электроэнергии, опреснять воду для социальных и сельскохозяйственных нужд и оказывать положительное влияние на климат прилегающих территорий. Однако по ряду эколого-экономических причин проект не был реализован.

В настоящей работе проведен комплексный геопространственный анализ возможности освоения Каттарской впадины. Исследования проводились на открытом программном обеспечении QGIS, SAGA GIS. Для работы использовались данные из открытых источников, а именно: данные цифровой модели поверхности Copernicus (пространственное разрешение 30м), данные дистанционного зондирования земли (ДДЗЗ) с аппаратов Landsat, данные Open Street Map, WHYMAP, данные USGS, CGIAR, климатические данные WorldClim, Global Precipitation Climatology Centre и др.

На базе опыта предыдущих работ ФГБУ «ГОИН» (Землянов, 2012, Землянов, 2010) разработан ГИС-проект «Qattara Depression». На рисунке 1 показана ЦМР исследуемой территории для расчетного уровня заполнения водохранилища -60 м над уровнем моря. Именно такой уровень был расчетным в трудах Ф.Басслера (Bassler, 1972). На основе цифровой модели поверхности посчитаны проектные морфометрические характеристики водохранилища при уровнях затопления от -100 до -60 м.

В ходе комплексного анализа смоделирована возможная трасса трубопровода, проведена оценка необходимой дорожной сети и определены места наиболее оптимального расположения населенных пунктов и туристических зон. Проведены оценки энергетического потенциала проектируемого водохранилища, потенциального испарения. Предложены несколько возможных сценариев реализации проекта. Подтверждено, что наиболее серьезной экологической проблемой является возможное засоление прилегающих территорий вследствие испарения воды из водохранилища и формирование обширных площадей сабх (солончаков) (Aref, 2002, Elsayed, 2019). В предложенных сценариях развития региона включены меры по минимизации ущерба и повышению экономической рентабельности

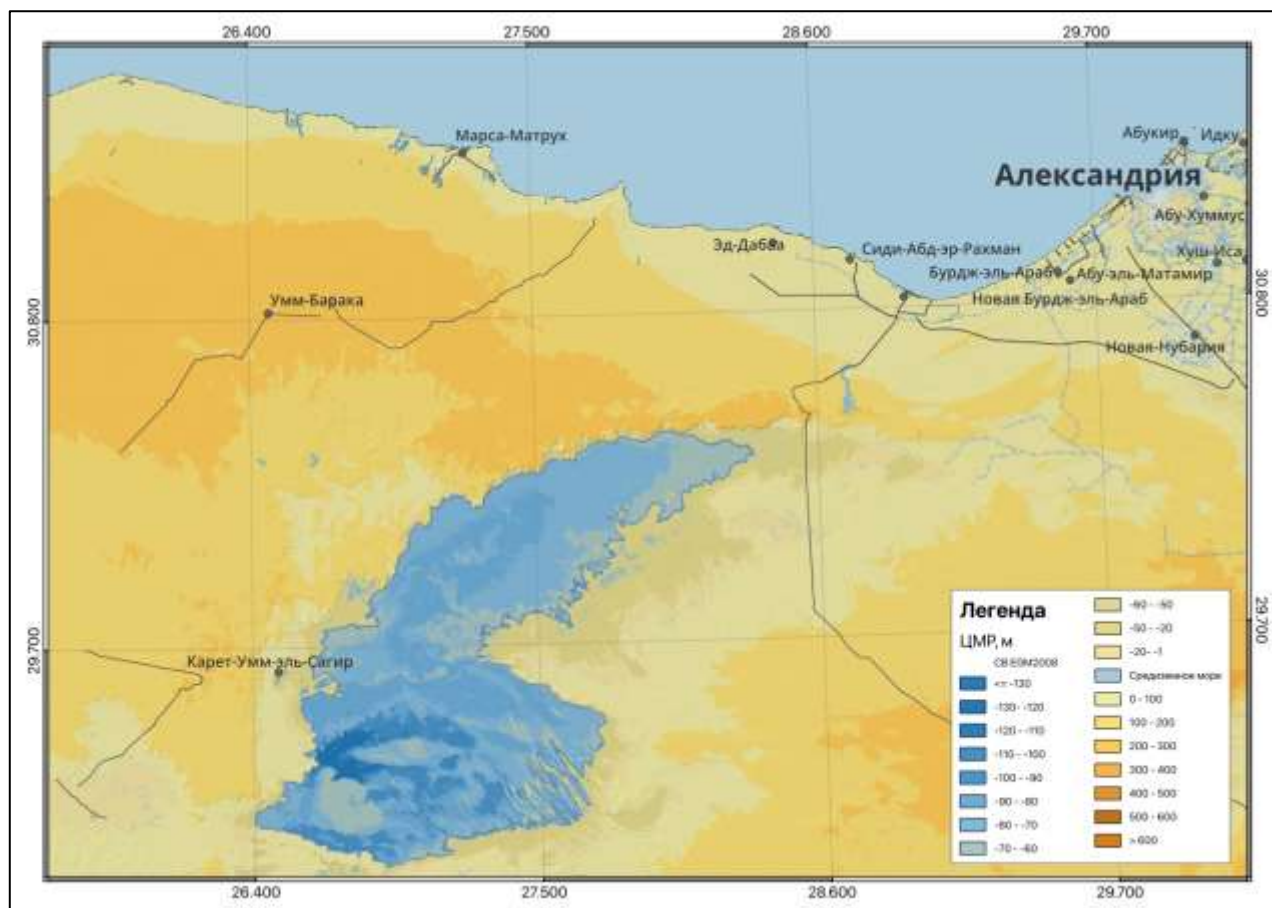


Рис. 1. ЦМР исследуемой территории Каттарской впадины

проекта. Важным природным фактором, который необходимо учитывать в дальнейших исследованиях, является сильная распространенность карстовых пород в исследуемом регионе.

Исследование показало, что Каттарская впадина, исторически являющаяся наиболее увлажненной и гидрологически активной частью Ливийской пустыни, обладает возможным потенциалом для улучшения водной и энергетической ситуации в регионе. Однако для успешного освоения территории необходимы дальнейшие исследования, направленные на решение экологических, гидрогеологических, землепользовательских и экономических вопросов.

Список литературы:

Землянов И.В., Горелиц О.В., Павловский А.Е., Шикунова Е.Ю. Использование геоинформационных технологий для оценки современных морфометрических характеристик водных объектов // Тр. ГОИН. 2012. Вып. 214. С. 260–271.

Землянов И. В., Горелиц О. В., Павловский А. Е., Шикунова Е. Ю. Уточнение морфологических характеристик водохранилищ Волжско-Камского каскада // Тезисы доклада на научно-техническом совете Верхне-Волжского бассейнового водного управления. Москва: ГОИН, 2010. С. 10.

Aref M.A.M., El-Khoriby E., Hamdan M.A. The role of salt weathering in the origin of the Qattara Depression, Western Desert, Egypt // *Geomorphology*. 2002. Vol. 45, Iss. 3–4. P. 181–195. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00152-0

Ball J. The Qattara Depression of the Libyan Desert and the Possibility of Its Utilization for Power-Production // The Geographical Journal. 1933. Vol. 82. No. 4 (Oct., 1933)/ Pp. 289–314.

Bassler F., Solar depression power plant of Qattara in Egypt // Solar Energy. 1972. Vol. 14. Iss. 1. Pp. 21–28. DOI:10.1016/0038-092X(72)90019-9.

Elsayed Marwa Adel, Ismaeel Walaa S.E. Ismaeel, Environmental assessment for major development projects: A case study “Qattara Depression” // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 215. Pp. 522–533. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.12.301.

УДК 556.18

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ВОДОДЕФИЦИТНОГО РЕГИОНА НА ПРИМЕРЕ ЗАПОРОЖСКОЙ ОБЛАСТИ РФ

Санин А.Ю.^{1,2}, Бортников Е.Г.¹

¹Мелитопольский государственный университет, Мелитополь, Россия

²Государственный океанологический институт им. Н. Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия

eather86@mail.ru

Аннотация. Геополитические изменения актуализируют важность развития туристического комплекса Запорожской области. Однако оно, как и восстановление экономики региона в целом, сдерживается дефицитом водных ресурсов, обострившимся после катастрофы на Каховской ГЭС в 2023 г., особенно в приморской полосе. Рассмотрены причины дефицита водных ресурсов в регионе и предложены пути его смягчения.

Ключевые слова: малые реки, туристская инфраструктура, Днепр, подземные воды, пруды, водохранилища, система водоснабжения.

Планы экономического развития Запорожской области и Приазовья в целом, в том числе и рекреационной отрасли, играющей важнейшую роль в развитии региона на текущем этапе, должны учитывать дефицит водных ресурсов. Указанное обстоятельство снижает качество жизни и становится, наряду с бедностью, причиной антисанитарии и роста заболеваемости населения (Данилов-Данильян, Лосев, 2006). В Запорожской области дефицит водных ресурсов существенно обострился в связи с разрушением плотины Каховской ГЭС в 2023 г.

К основным причинам дефицита пресных вод в Запорожской области и имеющихся проблем с водоснабжением могут быть отнесены следующие:

1) Сравнительно малое количество осадков (так, в г. Бердянске в среднем фиксируется всего 409 мм осадков в год (Лурье, Панин, 2021)) и высокая испаряемость, что определяет маловодность рек региона, сильное испарение с поверхности прудов, а также усиливает потребность в орошении;

2) Изношенность имеющихся водопроводов, что приводит к существенным потерям воды при транспортировке;

3) Неудовлетворительное состояние русел малых рек региона на их значительном протяжении (на некоторых участках части из них проводятся работы по улучшению^{41,42});

4) Разрушение плотины Каховской ГЭС в 2023 г.;

5) Некоторый отток инженерных кадров из региона и постоянные повреждения систем водоснабжения атаками беспилотных аппаратов.

В настоящее время ситуация несколько смягчается вследствие остановки части промышленных и сельскохозяйственных предприятий области, однако ожидается, что в будущем они возобновят свою работу, что может усилить остроту нехватки водных ресурсов.

Для решения проблемы дефицита пресных вод представляется весьма полезным опыт Крымского полуострова. В 2014 г. данный регион РФ столкнулся с острой нехваткой питьевой воды из-за прекращения ее транспортировки по Днепру через Северо-Крымский канал. Дефицит водных ресурсов в регионе удалось смягчить за счет интенсификации использования подземных вод, повышения эффективности использования вод, накапливаемых в прудах и водохранилищах, что описано в научной литературе (Николаенко и др., 2021, и др.). Важную

⁴¹ <http://council.gov.ru/events/news/158463/>. Дата обращения: 24.01.2026.

⁴² <https://tass.ru/obschestvo/21895257>. Дата обращения: 24.01.2026.

роль сыграл полный или частичный отказ от наиболее водоемких видов хозяйственной деятельности, например, выращивания риса, и наиболее емких производств: функционирования предприятий химической, металлургической промышленности и др. Перечисленные меры были неоднократно рекомендованы ведущими учеными, в частности, А. А. Тишковым в 2020 г.⁴³.

По всей видимости, Запорожской области предстоит «пройти аналогичный путь», что уже в какой-то степени происходит. Так, в городе Бердянске, третьем по величине населения в области, для компенсации вод из Каховского водохранилища, которые перестали поступать в город, началась разработка ранее не используемых горизонтов подземных вод, в том числе и так называемого Луначарского месторождения⁴⁴, расположенного в нескольких километрах от города. Это если и не привело к заметному улучшению ситуации с водоснабжением, то, по крайней мере, препятствует ее дальнейшему ухудшению. В настоящее время такие работы активно проводятся в области, что отражено в списке мероприятий по модернизации коммунальной инфраструктуры, предусмотренных на 2023–2025 гг., Программой комплексного развития и модернизации жилищно-коммунального хозяйства на территории Запорожской области⁴⁵ – мероприятия по реставрации имеющихся скважин и бурению новых играют в нем существенную роль. Естественные ресурсы подземных вод водосборных бассейнов малых рек Северного Приазовья оцениваются в 1.892 км³/год (Лурье, Панов, 2021), что дает основания рассчитывать на их использование как минимум для питьевых нужд и в будущем.

Однако для прибрежной полосы, в которой находятся достаточно крупные города Бердянск и Приморск, а также сельские поселения и курортные поселки, использование подземных вод для нужд водоснабжения часто затруднительно, так как у них может быть повышенная соленость вследствие перемешивания с водами Азовского моря.

Существенную роль для водоснабжения Крыма играют также многочисленные пруды и водохранилища, созданные на малых реках полуострова. Создание прудов и водохранилищ на реках для сельскохозяйственного использования в целом практикуется на Европейском Юге России: в Ростовской области, Краснодарском крае и т. д. К примеру, только на малых реках междуречья Дона и Кубани создано около 2000 прудов, далеко не все из которых функционируют (Суслов, 2015). Но для указанных регионов проблема дефицита водных ресурсов, а значит, и уничтожения или реставрации (после их инвентаризации) неиспользуемых прудов, стоит не настолько остро, как для Крыма и Северного Приазовья, в частности, Запорожской области. На малых реках Северного Приазовья также создано около 2 000 прудов, 96% которых имеют площадь зеркала менее 0.5 км² (Лурье, Панин, 2021), что ограничивает (однако не отменяет) их вклад в увеличение испарения поверхностных вод.

Кроме интенсификации использования ресурсов подземных вод, острота проблемы водообеспечения региона актуализирует необходимость выявления участков коммуникаций с наибольшими потерями воды при транспортировке и их капитальный ремонт/замену, что также проводится в последние годы⁴⁶.

Туристская отрасль традиционно играет ключевую роль в экономике региона, особенно его южной, приморской части. В частности, в крупнейшем приморском городе области Бердянске в последние десятилетия отмечалось резкое снижение роли промышленности и увеличение роли сферы услуг (преимущественно туристского сектора) в структуре занятости населения. Как следствие, нагрузка на водные ресурсы и в целом экосистему смежной с ним территории несколько снизилась. Данная ситуация – достаточно типичная для всего постсоветского пространства, во многих регионах и отдельных населенных пунктах которого

⁴³ <https://monocle.ru/expert/2023/24/spetsialnaya-vodnaya-operatsiya/?ysclid=mkkykg27mx9132848328>. Дата обращения: 24.01.2026

⁴⁴ <https://www.sonar2050.org>. Дата обращения: 24.01.2026

⁴⁵ Постановление Правительства Запорожской области № 519 27 декабря 2023 года

⁴⁶ Постановление Правительства Запорожской области № 519 27 декабря 2023 года.

наблюдалась значительная трансформация природопользования (Тишков, Ключев, 2010). В будущем можно ожидать если не роста роли туристской отрасли в регионе, то, как минимум ее сохранения. Рост роли туристской отрасли ожидается и для крупнейшего города на побережье Азовского моря в пределах новых территорий РФ – Мариуполя; это может быть общей тенденцией как минимум для прибрежной зоны Северного Приазовья.

К настоящему времени в научной литературе (Грибова и др., 2024; Кушнир, 2023, и др.) определены пути восстановления туристской отрасли региона, особенно при благоприятной геополитической обстановке и поддержке федерального центра. Важную роль здесь может сыграть использование результатов комплексной исследовательской экспедиции по оценке туристско-рекреационного ресурсного потенциала побережья Азовского моря, организованной РГО и КФУ им. В. И. Вернадского.

Именно туристская отрасль, благодаря мультипликативному эффекту, с большой долей вероятности послужит «движущей силой» экономического восстановления области, причем в какой-то степени даже во время СВО, и практически в любом случае – после ее завершения. Следовательно, среди всех аспектов негативного влияния дефицита водных ресурсов аспект его влияния на туризм – один из самых значимых. Но, безусловно, еще более важной проблемой может считаться необходимость обеспечения бесперебойного водоснабжения жителей региона.

Отдельно следует упомянуть, что в рамках реализации проекта развития новых федеральных круглогодичных курортов «5 морей и озеро Байкал» в Запорожской области планируется создание курорта на Обиточной косе, на участке побережья рядом с г. Приморск. При реализации такого масштабного проекта – предполагается строительство 100 гостиниц с общей рекреационной емкостью 15 тыс. койко-мест, а туристский поток по плану может достичь 2 млн человек⁴⁷ – нельзя не учитывать имеющиеся проблемы с водоснабжением региона (так, в стратегических документах отмечается, что системы водоснабжения и водоотведения Приморска требуют ремонта⁴⁸), которые могут обостриться после существенного увеличения потребления воды после запуска нового курорта. Заметим, что восстановление водоснабжения региона из Каховского водохранилища возможно не ранее, чем в среднесрочной перспективе (5–7 лет) и после завершения СВО, а также по факту научной экспертизы на предмет целесообразности реализации такого проекта. Следовательно, если реализация проекта строительства курорта начнется в соответствии с планами (по некоторым оценкам, в 2028 г.⁴⁹) и будет идти поэтапно, то на момент запуска как минимум части гостиниц (по имеющимся планам запуск первых 5000 мест размещения туристов возможен уже в 2030 г.⁵⁰) водоснабжение из Каховского водохранилища восстановлено, по всей видимости, не будет.

Основные аспекты негативного влияния дефицита пресной воды на различные виды хозяйственной деятельности в Запорожской области показаны в табл. 1, содержание которой, по сути, может считаться выводами.

⁴⁷ Стенограмма совещания по вопросу создания федеральных круглогодичных курортов «5 морей и озеро Байкал», проведенного Президентом РФ В.В. Путиным 28 марта 2024 года. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/73754>. Дата обращения: 14. 01.2026.

⁴⁸ Стратегия устойчивого развития Приазовья до 2040 года. Проект. Разработан Агентством стратегических инициатив в соответствии с Поручением Президента Российской Федерации В. В. Путина от 1 апреля 2023 г. № Пр-650 о разработке Стратегии развития акватории Азовского бассейна и территорий Приазовского побережья.

⁴⁹ Стенограмма совещания по вопросу создания федеральных круглогодичных курортов «5 морей и озеро Байкал», проведенного Президентом РФ В.В. Путиным 28 марта 2024 года. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/73754>. Дата обращения: 14. 01.2026.

⁵⁰ Проект Стратегии социально-экономического развития Запорожской области на 2024–2034 гг. Режим допуска: https://www.economy.gov.ru/material/file/5799ea4f6ecf0c6f03abc6911f88bfac/proekt_strategii_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_zaporozhskoy_oblasti_na_2024_2034_gg.pdf. Дата обращения: 24.01.2026.

Таблица. 1. Влияние дефицита пресной воды на различные виды хозяйственной деятельности в Запорожской области

Вид хозяйственной деятельности	Проблемы, связанные с дефицитом питьевой воды	Варианты решения или смягчения имеющихся проблем
Туристская деятельность	Перебои с водоснабжением как мест размещения организованных туристов, так и частного сектора и многоэтажного жилого фонда, которые используют самостоятельные рекреанты.	Использование морской воды для бассейнов при объектах размещения с целью снижения объемов потребляемой воды, утверждение курортного сбора и расходование его на ремонт систем водоснабжения, модернизация систем водоснабжения, активизация использования подземных вод, опреснение вод на отдельных участках побережья, в частности, для нужд нового федерального курорта «Приморск».
Промышленность	Нехватка водных ресурсов для водоемких производств, негативное влияние отключений воды на производственные циклы.	Переход на оборотные циклы водоснабжения, избегание развития наиболее водоемких производств в регионе, как минимум в краткосрочной перспективе, создание прудов для обеспечения потребностей предприятий.
Сельское хозяйство	Снижение урожайности на ряде участков из-за непостоянного орошения или его полного прекращения.	Переход к капельному орошению, по крайней мере, для культур с высокой урожайностью и добавленной стоимостью полученного урожая, избегание культивирования культур, для которых требуется значительное количество воды (например, риса), реставрация имеющихся прудов на реках.
Водоснабжение потребителей	Низкое качество потребляемых вод, перебои с водоснабжением.	Капитальный ремонт или замена участков водопроводов с наибольшими потерями воды, реставрация имеющихся скважин и создание новых, реставрация имеющихся прудов на малых реках области и создание новых.

Исследование выполнено в рамках государственного задания FRRS-2026-0021 «Оптимизация социально-экономической системы Запорожской области посредством развития туристско-рекреационного комплекса»

Список литературы

- Грибова Д.В., Кошелев В.А., Грибов М.А. Концептуальные основы развития туристических дестинаций в Запорожской области // Сервис в России и за рубежом. 2024. Т. 18. № 1. С. 117–126. DOI: 10.5281/zenodo.11177183.
- Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты // Москва: Наука, 2006. 221 с.
- Кушнир К.В. Опорный туристско-рекреационный каркас Российского Приазовья и перспективы его развития // Современные проблемы сервиса и туризма. 2023. № 2. С. 110–119.
- Лурье П.М., Панов В.Д. Реки бассейна Азовского моря: Гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону : Донской издательский дом, 2021. 672 с.
- Николенко И.В., Копачевский А.М. Основные направления разработки комплекса мер по решению проблем дефицита воды в Крыму // Техногенная безопасность. 2021. № 21(73). С. 147–160.
- Суслов О.Н. Степные реки Краснодарского края. Краснодар: Куб ГАУ, 2015. 256 с.
- Тишков А.А., Ключев Н.Н. Экосистемы в условиях постсоветской трансформации природопользования // Рациональное природопользование: международные программы, российский и зарубежный опыт. Т. 4. Устойчивое развитие: проблемы и перспективы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. С. 342–370.

УДК 556.535

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ РЕКИ ДЕВИЦА И АСПЕКТЫ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В ЕЕ БАССЕЙНЕ

Шишкин М.А., Дмитриева В.А.

Воронежский государственный университет. Воронеж. Россия. *newt.sr@bk.ru*

Аннотация. Река Девица – правобережный приток Верхнего Дона, имеет статус малой реки, но при этом является объектом водопользования. Водные ресурсы претерпевают изменения, которые связаны как с климатической трансформацией водного режима, так и водохозяйственной нагрузкой на речной водосбор. Целью настоящего исследования является установление суммарного воздействия природно-хозяйственных факторов на эколого-гидрологическое состояние реки Девица.

Ключевые слова: река Девица, Донской бассейн, водные ресурсы, водопользование

Река Девица (Красная Девица) – один из многочисленных притоков верховья Дона. Она берет начало из ключей у с. Кучугуры Нижнедевицкого муниципального района Воронежской области. Исток располагается на высоте 250 м, в наиболее возвышенной части всей Воронежской области. Протяженность реки $L=89.0$ км. Впадает в реку Дон на 1425 км от устья, у г. Семилуки. Площадь водосбора A составляет 1520 км^2 (Ресурсы..., 1964; Дмитриева, 2008). По своим морфометрическим параметрам длины и площади водосбора относится к малым рекам.

Гидрографическая сеть реки развита слабо, представлена сетью балок и оврагов, малыми притоками реки Девица, из которых наиболее значительные рр. Еманча ($L=31.8$ км), Ольшанка ($L=22.9$ км), Россошка ($L=16.1$ км), Калатушка ($L=12.0$ км). Простираение бассейна на Среднерусской возвышенности предопределяет высокую эродированность его поверхности, расчлененность балками и оврагами, а результатом водной эрозии является прогрессирующая трансформация пойменных ландшафтов (Дмитриева, Жигулина, 2020).

Гидрологическая изученность реки Девица достаточно высокая. В разное время гидрологический режим реки изучался на постах Нижнедевицк, Товарня, Девица. В 1947 г. была открыта Нижнедевицкая воднобалансовая станция, которая работает по настоящее время, но программа работ значительно сокращена. Уникальный материал наблюдений с достаточным объемом информации был получен по многочисленным малым водотокам-логам. В настоящее время почти все лога пересохли, за исключением ручья Ясенки, в котором сохраняется движение воды. В остальных логах ранее течение наблюдалось преимущественно в весенний период снеготаяния. Главными причинами отсутствия движения воды являются скудные половодья, как следствие климатических изменений текущего времени, и частично антропогенная деятельность в бассейне реки, ведущая к деградации малых, наиболее уязвимых природных водотоков.

Гидрологические наблюдения продолжает вести гидропост в с. Девица. Он функционирует с 1956 г. и осуществляет полный комплекс гидрологических наблюдений и измерений, предусмотренный программой работ, а именно, измерение стоковых характеристик, ледового, термического и гидрохимического режима. Непрерывный ряд гидрологических параметров позволяет выявить характерные черты и изменения в многолетних колебаниях, оценить их временную изменчивость, рассчитать водные ресурсы и др.

Объемы воды в русловой сети меняются во времени. Их колебания отражают преимущественно природно-климатические факторы формирования речного стока, которые в настоящее время, при относительной стабильности хозяйственной деятельности на водосборе, играют доминирующую роль. Глобальное потепление в северном полушарии, региональное нарастание годовой и сезонных температур воздуха, динамика приповерхностной температуры воды (Третий..., 2022; Василенко и др., 2020) вызывают ответную реакцию в

колебаниях запасов воды в водных объектах. Характерной общей закономерностью водного стока является снижение максимальных объемов, увеличение минимальных объемов и мало меняющиеся годовые объемы. На примере р. Девица - с. Девица в годовых объемах водных ресурсов тенденция снижения более выражена в годы стабильного потепления (рис. 1).

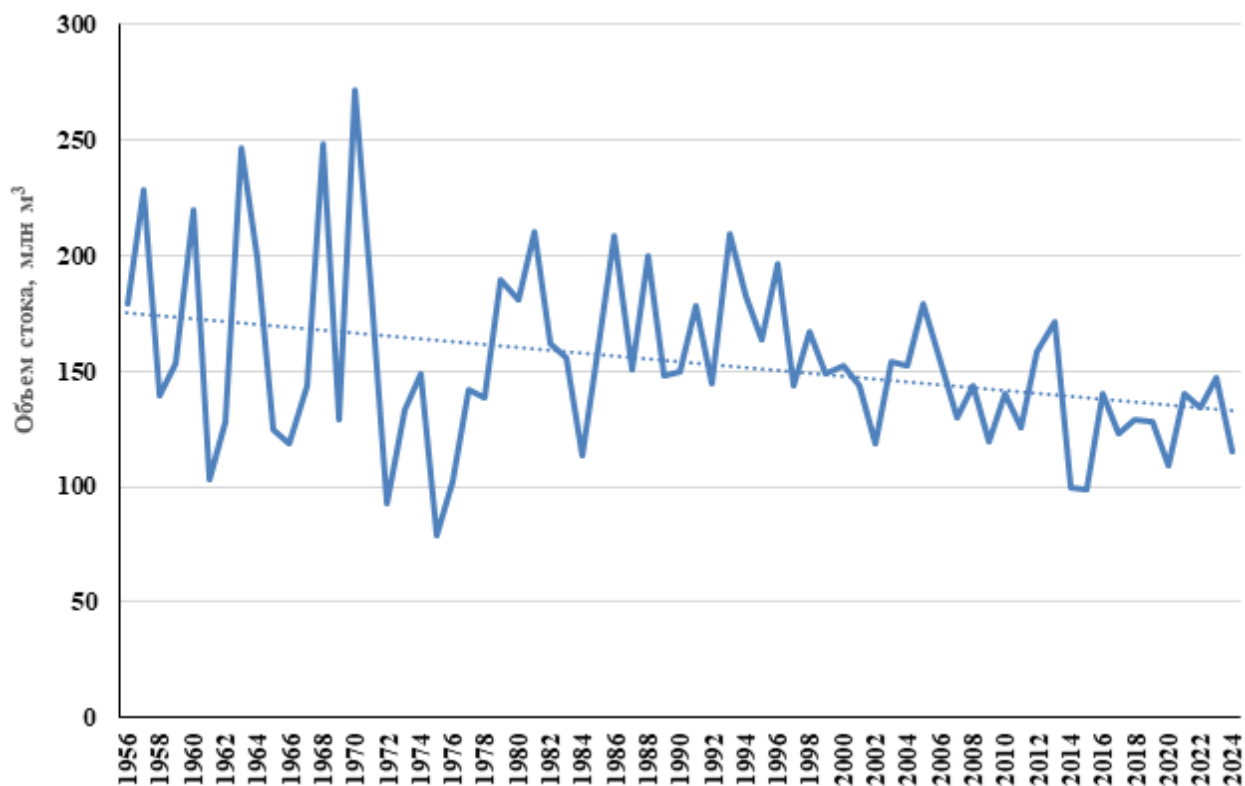


Рис. 1. Годовые объемы водных ресурсов р. Девица – с. Девица за 1956-2024 гг.

Как следует из рисунка 1, пониженные значения объемов годового стока с меньшим размахом вариаций начинаются с 1986 г. после относительно низкого по водности 1984 г. В ряду наблюдений самый маловодный год был 1975 г., отметившийся в климатической истории региона как год жесточайшей засухи. В целом, в гидрологическом ряду стоковых характеристик р. Девица – с. Девица формируется тенденция снижения годового речного стока. По сравнению с другими реками региона многолетний ход объемов годового стока имеет наиболее выраженный характер с тенденцией снижения.

В условиях пониженной водности текущего столетия, череды маловодных лет в бассейне Дона, водные ресурсы реки Девица остаются востребованы в водохозяйственной деятельности. Ряд предприятий промышленного, коммунально-бытового и иного назначения используют воду реки для удовлетворения своих потребностей. Из реки часть предприятий забирают воду, и они же осуществляют сброс сточных вод, часть предприятий только сбрасывают сточные воды, но и те, и другие подвергают реку точечному загрязнению. Всего на реке осуществляют хозяйственную деятельность 7 водопользователей, из которых 3 осуществляют забор воды, 3 сбрасывают сточные воды и 1 использует водный объект для рекреационных целей. Их расположение относительно устья реки до впадения в Дон показано на рисунке 2.



Рис. 2. Линейная схема расположения водопользователей вдоль русла р. Девица
Номерами 1–8 показано местоположение забора и сброса сточных вод водопользователей, а пояснение по ним дается в табл. 1.

Таблица 1. Список водопользователей вдоль р. Девица.

Обозначение	Водопользователь	Цель водопользования	Расстояние от устья, км
0	Гидрологический пост	—	12
1	ООО "ЮВЕНТА и К"	Сброс сточных вод	13.6
2	ОАО "Воронежское рудоуправление"	Забор водных ресурсов	15
3	ООО УК "Гарант Эксперт-Сервис"	Сброс сточных вод	15.6
4	КФХ	Забор водных ресурсов	27
5	Администрация Хохольского городского поселения Хохольского муниципального района	Эксплуатация пляжей	30.7
6	ООО "ХСК"	Забор водных ресурсов	31.2
7	МУП "Нижедевицк"	Сброс сточных вод	75.5

Анализ гидроэкологического состояния реки Девица выполнен нами за 2015-2023 гг. Необходимые гидрологические материалы по речному стоку р. Девица – с. Девица заимствованы из гидрологических ежегодников и фондов Воронежского гидрометцентра, а информация об использовании вод получена из отдела водных ресурсов по Воронежской и Липецкой областям Донского бассейнового водного управления.

Общий среднесноголетний сброс сточных вод за исследуемый период составляет 128.57 тыс. м³. ООО Хохольский сахарный комбинат (ХСК) и МУП «Нижедевицк» имеют примерно равные доли сброса; сброс от ООО «Ювента и К» незначителен. Анализ общего сброса по месяцам указывает на равномерное внутригодовое распределение объемов за исключением минимального в июле со значением 9.51 тыс. м³ и максимального в октябре – 11.78 тыс. м³.

Сопоставление объемов забора воды с объемами стока реки показало, что деятельность водопользователей не приводит к значительным изменениям объемов стока: наибольшая доля забранной воды от объема стока наблюдалась в 2017 г. (1%). В среднесноголетнем разрезе по месяцам можно отметить интервал с наиболее интенсивным изъятием водных ресурсов (по доли забранного объема воды) – с сентября по декабрь включительно (1.9–2.4% от объема стока за месяц). Ведущим водопользователем является ООО "ХСК" (75% общего объема).

Все водопользователи с разрешенным сбросом сточных вод представляют характеристику загрязняющих веществ (ЗВ) в сточных водах по 16 показателям. Для оценки загрязненности воды массы всех компонентов переведены нами в мг, а объемы сбросов – в дм³.

Отнеся полученные значения массы к объемам сбрасываемых вод, получили концентрации ЗВ в мг/дм³. Сопоставив эти значения с величиной ПДК, определили превышения концентрации ЗВ в сбрасываемых водах относительно нормативно допустимых. Расчеты показали, что концентрации 10 ЗВ из 16 в сбрасываемом стоке превышают нормативно допустимые значения (ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения). Среди определяемых показателей наибольшими среднесуточными превышениями отличаются взвешенные вещества (в 34.5 раза), БПКполн (в 25.2 раза), азот аммонийный (в 16 раз) и НСПАВ (в 5.7 раз). Наиболее низкие превышения (< 5 раз) отмечены для АСПАВ, аммоний-иона, железа, нефтепродуктов, нитрит-иона и фосфат-иона.

Несмотря на значительные превышения предельно допустимых концентраций по некоторым компонентам в объеме сбрасываемых сточных вод, серьезной угрозы для реки Девица в настоящее время данные сбросы не представляют ввиду малого их объема относительно объема стока реки в соответствующие годы (максимальная доля сброса в объеме стока за соответствующий месяц наблюдалась в августе 2015 г. – 0.41%). Кроме того, благодаря физическим, химическим и биологическим процессам самоочищения реки, попадающие в нее загрязняющие вещества снижают свои агрессивные свойства. Однако, при условии сохранения тенденции в водном режиме реки, в частности, снижении ее водности, в перспективе гидроэкологическая ситуация может усугубляться.

Таким образом, анализ водопользования в русле р. Девица показывает, что сброс ЗВ от функционирующих предприятий в текущем объеме не представляет угрозу гидрохимическому режиму. Однако, нужно иметь в виду, что загрязнения в реку поступают не только от организованных потребителей, но и с диффузным поверхностным стоком с речного водосбора, влияние которого в нашей работе не изучалось. Учет всех видов загрязнений и путей их поступления позволит выявить возможные тенденции в трансформации качества речной воды и принять превентивные меры для его повышения.

Список литературы:

- Василенко А.Н., Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л. Закономерности изменений среднегодовой температуры воды рек Арктической зоны России в связи с изменениями климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 8–22.
- Дмитриева В.А. Гидрологическая изученность Воронежской области. Каталог водотоков. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронеж. гос. ун-та, 2008. 225 с.
- Дмитриева В.А., Жигулина Е.В. Динамика водности малых водотоков Верхнедонского бассейна и ее роль в структурно-динамической организации ландшафтов // Региональные геосистемы. 2020. № 44(4). С. 404–414.
- Дмитриева В.А., Нефедова Е.Г. Качество поверхностных вод Воронежской области: монография. Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2018. 212 с.
- Ресурсы поверхностных вод. Гидрологическая изученность. Т. 7. Донской район. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 267 с.

УДК 550.47

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ АКВАТОРИЙ

Подлипский И.И.

СПбГУ (биологический факультет, кафедра Прикладной экологии),
ООО «ОГЕО-Проект», г. Санкт-Петербург, Россия, ecoadvisor@mail.ru

Аннотация. Рекультивация нарушенных земель водных объектов – это комплекс инженерно-технических и биологических мероприятий по восстановлению загрязненных водоемов. В мировой практике выделяют 4 основных подхода. Выбор метода зависит от типа и масштаба загрязнения. В России особую проблему представляет правовой статус донных отложений, не имеющий четкого определения. Современный тренд – комбинирование методов.

Ключевые слова: рекультивация нарушенных земель, донные отложения, физико-механические методы, биологические методы, химические методы, инженерно-технические методы, загрязнение, экологическое состояние, мониторинг.

Рекультивация водных объектов представляет собой комплекс инженерно-технических и биологических мероприятий, направленных на восстановление экологического состояния загрязненных водоемов и водотоков. Актуальность этих работ возрастает в условиях усиления антропогенной нагрузки на гидросферу.

В мировой практике применяются 4 основных подхода, выбор которых зависит от типа, масштаба загрязнения и экономических возможностей (Кнатько и др., 2013; Dubrova, 2015):

1. Физико-механические методы. Наиболее радикальный и широко используемый как в России, так и за рубежом подход. Он включает выемку (драгирование) загрязненных донных отложений (ДО) с последующей их перевозкой, обезвоживанием и размещением. В России для грунтов «чрезвычайно опасной» категории загрязнения стандартной конечной точкой являются специализированные полигоны. Для донных отложений такой вариант теоретически тоже приемлем, но сопряжен с рядом технических сложностей. Как результат, особенно в морских портах, например, при дноуглубительных работах в портах Санкт-Петербурга и/или Новороссийска, применяется альтернативный подход - размещение в специально отведенных подводных отвалах, что регламентировано проектной документацией и требует постоянного мониторинга.

2. Биологические методы. Эти подходы основаны на способности водных растений (например, пресноводных макрофитов, таких как рогоз широколистный (*Typha latifolia*), тростник южный (*Phragmites australis*), элодея канадская (*Elodea canadensis*)) и микроорганизмов поглощать, трансформировать и накапливать загрязнители. В РФ такие методы (биоремедиация) часто применяются для доочистки вод после механического удаления основных масс загрязнений или на слабозагрязненных объектах. Создаются искусственные биоплато - зарослевые участки, выполняющие роль фильтров. За рубежом, в странах ЕС и США, этот метод получил более широкое развитие как часть концепции "мягких" (soft engineering) инженерно-экологических решений, интегрированных в ландшафт.

3. Химические методы. Заключаются во внесении в водную толщу или в донные отложения реагентов-сорбентов (природные цеолиты, глины) или коагулянтов, которые связывают растворенные вещества и/или различные формы тяжелых металлов, переводя их в нерастворимую форму. В чистом виде в РФ применяются редко из-за риска вторичного загрязнения и сложности точного дозирования, но могут использоваться в комбинации с другими методами, например, для локализации пятен нефтепродуктов.

4. Инженерно-технические методы (изоляция и стабилизация). Эти технологии направлены не на удаление загрязнения, а на минимизацию его воздействия на экосистему. Можно рассмотреть два варианта реализации метода, нашедших применение в РФ:

- *изоляция (капсуляция)* (загрязненные отложения укрываются на месте слоем инертных материалов - песком, гравием, геотекстильными матами или их комбинацией, что создает физический (механический) барьер, препятствующий вторичному загрязнению водной толщи; метод эффективен для локальных участков с низкой и средней степенью загрязнения);

- *стабилизация на месте (in situ)* (более сложный метод, при котором в ДО вносятся (добавляются, инжектируются) реагенты (цемент, известь, бентонит, современные геополимеры, авторские концепты, например, ИММ-технология (Кнатко и др., 2013)), вызывающие их твердение (геополимеризация, инкапсулирование загрязнителей) - формируется плотный, стабильный массив, препятствующий развитию вторичного загрязнения).

Еще одной важной проблемой в прикладной сфере в данной области является обращение с загрязненными донными отложениями. В России до сих пор не существует единого и четкого правового определения и классификации ДО. Они находятся в правовом вакууме между несколькими категориями:

- не отходы (согласно Федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО), ДО не выделены как отдельный вид отхода. Если их не извлекают с целью утилизации или захоронения, а, например, используют для намыва территорий, они формально не являются отходом);

- не грунт в классическом смысле, как основание зданий и сооружений (согласно ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация», ДО, особенно илистые и органические, часто не соответствуют нормируемым строительным характеристикам (несущая способность, деформационные свойства) и не могут быть использованы);

- особая группа веществ – «донные грунты» (на практике в проектной документации, особенно по дноуглублению, используется именно этот термин. Но он нормативно не закреплён, что порождает некоторые).

Оценка уровня загрязнения ДО наиболее полно отображена в СП 502.1325800.2021 (п. 5.14.4 и некоторых работах (Коннонова и др., 2016; Терехова и др., 2017)). Она выполняется одним из рекомендуемых способов сравнения:

- концентраций определяемых веществ, содержащихся в донных отложениях, с фоном, установленным для района распространения объекта (по фондовым данным профильных организаций);

- концентраций определяемых веществ, содержащихся в донных отложениях, с фоном, установленным натурным путем вне зоны загрязнений (при условии идентичности типов донных отложений);

- концентраций определяемых веществ, содержащихся в донных отложениях, с ПДК (ОДК) почв;

- концентраций определяемых веществ, содержащихся в морских донных отложениях, с уровнями загрязнения, установленными на основании актуальных источников;

- при наличии региональных нормативов оценку состояния донных отложений проводят путем установления регионального уровня загрязнения донных отложений в поверхностных водных объектах.

Выбор технологии обращения с донными грунтами определяется степенью загрязнения, что отражено в разработанной логической схеме (рис. 1).



Рис. 1. Схема обращения с донными отложениями в зависимости от уровня загрязнения

Таким образом, современная рекультивация водных объектов – это не единичная технология, а системный выбор из арсенала методов, основанный на детальной диагностике. Трендом как в России, так и в мире является комбинирование подходов: механическое удаление наиболее опасных фракций с последующей биологической доочисткой и инженерной стабилизацией. Успех определяется не только технологической грамотностью, но и эффективной системой последующего мониторинга, обеспечивающей долгосрочную экологическую безопасность восстановленных акваторий.

Список литературы:

Коннонова Л.А., Подлипский И.И., Зеленковский П.С., Хохряков В.Р. Расчет коэффициента суммарного загрязнения в почвах и донных отложениях рекреационной зоны национального парка "Смоленское Поозерье" // Экологические проблемы недропользования: Материалы Шестнадцатой международной молодежной научной конференции, Санкт-Петербург, 06–09 июня 2016 года. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2016. С. 260–262. EDN UPTRSX.

Терехова А.В., Подлипский И.И., Зеленковский П.С., Хохряков В.Р. Определение фоновых содержаний тяжелых металлов в почвах и донных осадках центральной части национального парка "Смоленское Поозерье" // Экологические проблемы недропользования: Материалы семнадцатой международной молодежной научной конференции, Санкт-Петербург, 29–30 мая 2017 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2017. С. 67–74. EDN ZMSWAN.

Кнатько М.В., Кнатько В.М., Подлипский И.И., Камышев В.Ю. Утилизация нефтяных и нефтехимических отходов в производстве продукции путем оптимального сочетания различных видов отходов // Нефть. Газ. Новации. 2013. № 10(177). С. 77–82. EDN RFWVCR.

Dubrova S.V., Podlipskiy I.I., Kurilenko V.V., Siabato W. Functional city zoning. Environmental assessment of eco-geological substance migration flows // Environmental Pollution. 2015. Vol. 197. P. 165-172. DOI 10.1016/j.envpol.2014.12.013.

УДК 626, 627

РЕГЛАМЕНТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ, ПРИЛЕГАЮЩИХ К КРУПНЫМ ГИДРОУЗЛАМ, В СВЕТЕ НОВЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СРЕДОЙ

Шумакова Е.М.¹, Митина Н.Н.^{1,2}

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, *spectr56@gmail.com*

²Московский государственный университет, Москва, Россия.

Аннотация. На основе экспериментальных данных о вибрации грунтов вблизи работающих гидроузлов в России и Китае оценено влияние природных и техногенных факторов на картину вибраций, показаны схожие черты и особенности, в том числе, не имеющие научного обоснования и нормативного обеспечения. Показана необходимость учета вибраций плотин при строительстве и эксплуатации гидроузлов и прилегающих территорий

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, плотина, пропуск паводка, вибрации грунтов, резонансные колебания зданий, разрушение конструкций

На основе экспериментальных данных о вибрации грунтов и зданий вблизи работающих гидроузлов в России и Китае проведено сопоставление природных и техногенных факторов, влияющих на характеристики возникающих вибраций. Это конструкционные особенности, режимы работы водохранилища и гидроузла, геология местности и др. Можно говорить о недоучете действия известных факторов, изменении ситуации с течением времени, обнаружении действия новых факторов, трудности их признания и внедрения в практику. Проведена оценка влияния различных природных и техногенных факторов на картину вибрационного воздействия, показаны схожие черты и особенности, в том числе, не имеющие обоснования в рамках существующих научных представлений и действующих нормативов.

Несмотря на то, что изначально вибрации возникают при пропусках паводков и половодий, особенно экстремальных, через плотину, то есть, связана с водой, энергией ее падения, изучение вибраций далеко выходит за рамки задач и предмета традиционной гидрологии, которая на зарегулированных водотоках с каскадами ГЭС уже носит специфический характер (Симаков, Шумакова, 2010).

Правовая неопределенность приплотинных территорий, явно включенных в область влияния гидроузлов, но никак ими не контролируемая, приводит к абсурдным результатам: когда в зоне сезонного либо аварийного затопления находятся жилые объекты, здания вовлекаются в процесс интенсивных вибраций при работе гидроузлов, а их расположение осложняет работу гидросооружений.

Вибрации представляют опасность для самой плотины и для окружающих территорий, приводя к разрушению строительных конструкций зданий, нарушая комфортность проживания населения.

Несмотря на то, что информационная основа для принятия административно-правовых решений создана давно, и разработаны несложные предложения по регулированию ситуации с вибрационным воздействием, эти предложения остаются без внимания, в основном, игнорируются застройщиками в связи с крайней привлекательностью прибрежных земель. Одним из аргументов являлась якобы уникальность ситуации в районе Жигулевской ГЭС., в связи с чем нецелесообразно распространять опыт на иные приплотинные территории (Шумакова, Ващенко, 2018; Mitina et al., 2020).

Однако во втором десятилетии XXI века интенсивные вибрации грунтов проявились вблизи крупных ГЭС КНР (Ma et al. 2020; Wang et al., 2017; Zhang et al., 2021a, 2021b).

Сравнение результатов измерений вибраций грунтов вблизи плотин РФ и КНР показало, что имеют место идентичные процессы, хотя плотины существенно отличаются по высоте, длине, конструкции плотины и водосбросов, заявленной мощности, особенностям эксплуатации – в КНР наблюдаются экстремальные дождевые паводки, в РФ весенние

половодья, общегеологическим условиям и рельефу местности, инженерно-геологическим условиям (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики гидроузлов КНР и РФ, в районе которых зафиксировано интенсивные вибрации грунтов территорий.

ГЭС	Конструкция плотины	Высота дамбы, м	Длина дамбы, м	Мощн., МВт	Полн./полезн. емк. вдхр, км ³	Конструкция водосливов для холостых попусков
Сянцзяба	плотинная, плотинно-деривационная	161	900	6 448	5.2/0.9	для сброса и отвода воды используются в том числе гидроагрегаты
Силоду	плотинно-деривационная	285.5	700	13 860	12.67/6.46	-
Цзиньпин-I	арочная	305 (расчетный напор 240 м)	569	3600	7.76/4.91	на гребне до 3000 м ³ /с; пять нижних вып. отв. до 5470 м ³ /с; тоннель до 3650 м ³ /с
Эртан	арочная	240	775	3300	5.8/-	водосбросы на гребне, два туннеля – 6260 м ³ /с и 7400 м ³ /с; средние и донные отверстия – 6930 м ³ /с и 2084 м ³ /с
Жигулевская (Волга, Россия)	плотинная русловая	45 (напор 21)	5000	2488	57.3/23.4	отдельная водосливная плотина 40* 980 м из 10 секций до 38000 м ³ /с

За пределы принятых представлений выходят:

- более дальнейшее распространение вибраций от работающего гидроузла, чем предполагалось при проектировании и в РФ, и в КНР;
- наблюдаются интенсивные вибрации рыхлых грунтов – в РФ и в КНР, и даже при переходе со скальных грунтов на рыхлые усиливаются (КНР);
- зафиксировано влияние тектонических разрывных нарушений как волноводов, приводящих к вибрациям на большом удалении от плотины – в РФ и в КНР;
- скачкообразное усиление интенсивности вибраций при неизменном режиме работы ГТС (РФ) непонятной природной либо техногенной природы;
- совпадение амплитудно-частотных характеристик вибраций грунтов в районе ГТС с различающимися характеристиками (техническими, геологическими гидрологическими);

На примере Жигулевской ГЭС показано предположительное влияние соосности плотины и зданий территории на усиление вибраций зданий, что требует учета при застройке приплотинных территорий.

И в РФ, и в КНР показано определяющее влияние гидрологического цикла на вибрационное воздействие, которое выражено наиболее интенсивно при пропуске паводков и половодий.

Возникающие вибрации схожим образом действуют на здания, а именно: наблюдается резонансная раскачка зданий, вибрации дверей и оконных рам в проемах, их деформация; вибрации субъективно ощущаются жителями, нарушается комфортность их проживания.

В РФ мониторинг с 2000 г. показал, что происходит постепенное разрушение ограждающих строительных конструкций зданий под действием вибраций. Первые трещины очевидным образом проявились уже через 20 лет эксплуатации, с течением времени разрушения нарастают. Основным мероприятием по снижению негативного влияния вибраций на здания в РФ служит поддерживающий ремонт ограждающих конструкций,

который, однако, выполняется материалами без учета вибрационного воздействия, что делает результаты ремонта недолговечными, приводит к нерациональному использованию средств (рис. 1).



Рис. 1. Состояние ограждающих конструкций типового крупнопанельного 9-этажного здания в 2 км от плотины после частичного (слева) и полного (справа) ремонта торца. Состояние на 2025 г. (фото автора)

Подводя итоги: имеется вибрационное воздействие при попусках, проявляющееся за пределами промышленной площадки вблизи плотин, существенно различающихся по своим характеристикам. Проявление подобного воздействия стало неожиданностью, не предусмотренной при проектировании гидроузлов.

Воздействие проявляется субъективно и объективно, приводит к негативным процессам в зданиях, нарастающим со временем.

Вопрос регламентации данного воздействия не решен ни в РФ, ни в КНР, самостоятельно инвестирующих в проекты. Для стран, собирающихся в будущем возводить плотины при международном финансировании, учесть вибрационное воздействие также практически невозможно, так как решение принимает инвестор на основе международных рекомендаций, в которых вибрационное воздействие на территории не фигурирует. В целом, в отношении ГТС требование учета большинства факторов, влияющих на устойчивость плотин, носит достаточно рекомендательный характер, не говоря о прилегающих территориях.

Не определен порядок, согласно которому научные результаты становятся одним из требований при проведении изысканий под строительство ГТС.

Результаты изучения вибрационного воздействия попусков через ГТС на окружающие территории могут быть использованы при эксплуатации уже имеющихся ГЭС и при возведении ГТС, где использование уже имеющихся научных результатов могло бы в дальнейшем избежать проблем с вибрационным воздействием на селитебные территории.

Благодарности. Автор выражает благодарность студентам ФГУ МГУ им. М. В. Ломоносова из КНР, сделавшим возможным изучение закономерностей вибрационного воздействия ГЭС КНР.

Работа выполнена в составе фундаментальных исследований по теме «Исследования процессов формирования качества поверхностных и подземных вод, природных и антропогенных механизмов изменения экологического состояния водных объектов, разработка методов и технологий управления водными ресурсами и качеством вод (FMWZ-

2025-0002)), Проект 7.2 «Анализ охраны и использования природных вод в Китайской Народной Республике и странах Центрально-Азиатского региона в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и регулирования стока».

Список литературы:

Симаков С.В., Шумакова Е.М. Гидрологические аспекты безопасности Жигулевской ГЭС и примыкающих к ней территорий. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1–9. С. 2255–2260.

Шумакова Е.М., Ващенко М.О. О возможности и целесообразности государственного регулирования эксплуатации территорий, прилегающих к гидроузлам федерального значения // Государственное управление Российской Федерации: вызовы и перспективы. Материалы 15-й Международной конференции. 2018. С. 414–419.

Ma B., Ge J., Liang S., Lian J. Study on characteristics of vibration in the foundation and induced by flood discharge and optimization of flood discharge scheme of high arch dam. Tianjin Daxue Xuebao. 2020. Т. 53. № 1. С. 27–34.

Mitina N., Vashchenko M., Shumakova E. Modern problems of state regulation of operation of state regulation of operation of a large hydroelectric plants dam's area // E3S Web of Conferences. 4th Vinogradov Conference "Hydrology: from Learning to Worldview" in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov, VC 2020. 2020. С. 03011.

Wang X., Hu Y.-A., Luo S.-Z., Zhang L.-C., Wu B. Prototype observation and influencing factors of environmental vibration induced by flood discharge // Water Science and Engineering. 2017. Vol.10. No. 1. С. 78–85.

Zhang Y., Li S., Zhang G., Liu Y., Lian J., Zhao Y. Predicting dam flood discharge induced ground vibration with modified frequency response function // Water. 2021. TVol. 13. No. 2. С. 144.

Zhang Y., Zhang G., Liu Y., Li S., Lian J., Song M. Ground vibration characteristics induced by flood discharge of a high dam: an experimental investigation // Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2021. Vol. 13. No. 1.

ЗАОЧНЫЕ УЧАСТНИКИ

УДК 553.735; 614.7.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

Абдулмуталимова Т.О.

Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ ДФИЦ РАН), 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, д.75, tamila4@mail.ru

Аннотация. Подземные воды республики представлены родниками (в южной горной части) и высоконапорными артезианскими водами (в северной равнинной части). Целью исследования явился анализ качественного состава подземных вод с выявлением приоритетных загрязнителей. Результаты исследования выявили, что основным фактором, влияющим на формирование гидрогеохимических свойств подземных вод региона, являются особенности геологического строения и химический состав водовмещающих горных пород.

Ключевые слова: подземные воды, артезианские воды, геогенные элементы, мышьяк.

Известно, что на формирование качественного состава подземных вод влияют геолого-структурные особенности района, его металлогения, литолого-минералогические особенности, а также физико-химические условия миграции элементов и их комплексных соединений.

Разнообразие и многообразие природных ландшафтов Республики Дагестан обуславливают гидрогеохимические свойства подземных вод региона. Так, в приморской части Дагестана распространены высокоминерализованные воды хлоридно-натриевого состава с повышенным содержанием микроэлементов: йода, брома, бора. В горной части распространены слабоминерализованные воды с низким содержанием микроэлементов. В центральном горном Дагестане с высокоминерализованными соседствуют слабоминерализованные бессульфатные хлоридно-натриево-кальциевые воды. В северной равнинной части отмечаются воды гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевого типа с повышенным содержанием мышьяка (Кондаков и др., 2019; Абдулмуталимова и др., 2023).

Учитывая, что подземные воды региона на 70% покрывают потребности населения в питьевом водоснабжении, следует оценивать качество этих вод согласно санитарно-гигиеническим требованиям⁵¹, предъявляемым к питьевой воде.

Формирование ресурсов подземных вод южной части Дагестана происходит преимущественно на территориях речных долин горных рек, а основными источниками питания их являются инфильтрация речных вод, атмосферные осадки, а также подземный сток из коренных пород (Самедов, 2011). Анализ литературных источников по образцам подземной воды в горной части Дагестана выявил повышенные значения жесткости, сульфатов, а также дефицит содержания йодидов, калия, магния, кальция, фторидов. По всем остальным показателям, образцы подземной воды соответствовали гигиеническим требованиям, предъявляемым к питьевой воде. Следует отметить, что дефицит йода наблюдался практически во всех проанализированных образцах, что подтверждает эндемичность региона по такому заболеванию, как диффузный, или узловый зоб (Салихов и др., 2014; Алиметова, 2017).

Полезные воды равнинной части приурочены к Терско-Кумскому артезианскому бассейну, сложенному плиоцен-плейстоценовыми отложениями и являющемуся крупнейшим

⁵¹ Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" (рег. № 62296). М.: Госкомсанэпиднадзор России, 2021.

резервуаром пресных артезианских вод, ресурсы которого являются важнейшим источником хозяйственно-бытового водоснабжения населения. Многолетние исследования и обработка большого фактического материала по гидрогеологии, гидродинамике, гидролого-климатическим условиями позволяют выявить в изучаемом бассейне участки, сформированные геологическими структурами с аномальными (повышенными и пониженными) содержаниями химических элементов, геотемпературными условиями и газоносностью. Происхождение этих аномалий объясняется рядом геолого-гидрологических условий, в том числе наличием восходящего потока подземных вод, а также очагами естественной разгрузки высокоминерализованных хлоридно-натриевых вод по воздыманию водоносных горизонтов палеогеновых и мезозойских отложений (Курбанов, 2023). В пределах артезианского бассейна воды на значительной части содержат комплекс микрокомпонентов: наряду с железом, марганцем (рис. 1), в подземных водах отмечаются высокие концентрации мышьяка (рис. 2), который относится к первой, наиболее опасной, группе канцерогенных веществ (ATSDR, 2007). В природных условиях мышьяк в водоносные горизонты поступает при выщелачивании мышьякосодержащих минералов, при этом образуются арсенаты, в анаэробных условиях – арсиниты и арситы, а в природных водах мышьяк находится в форме анионов мышьяковой и мышьяковистой кислот.

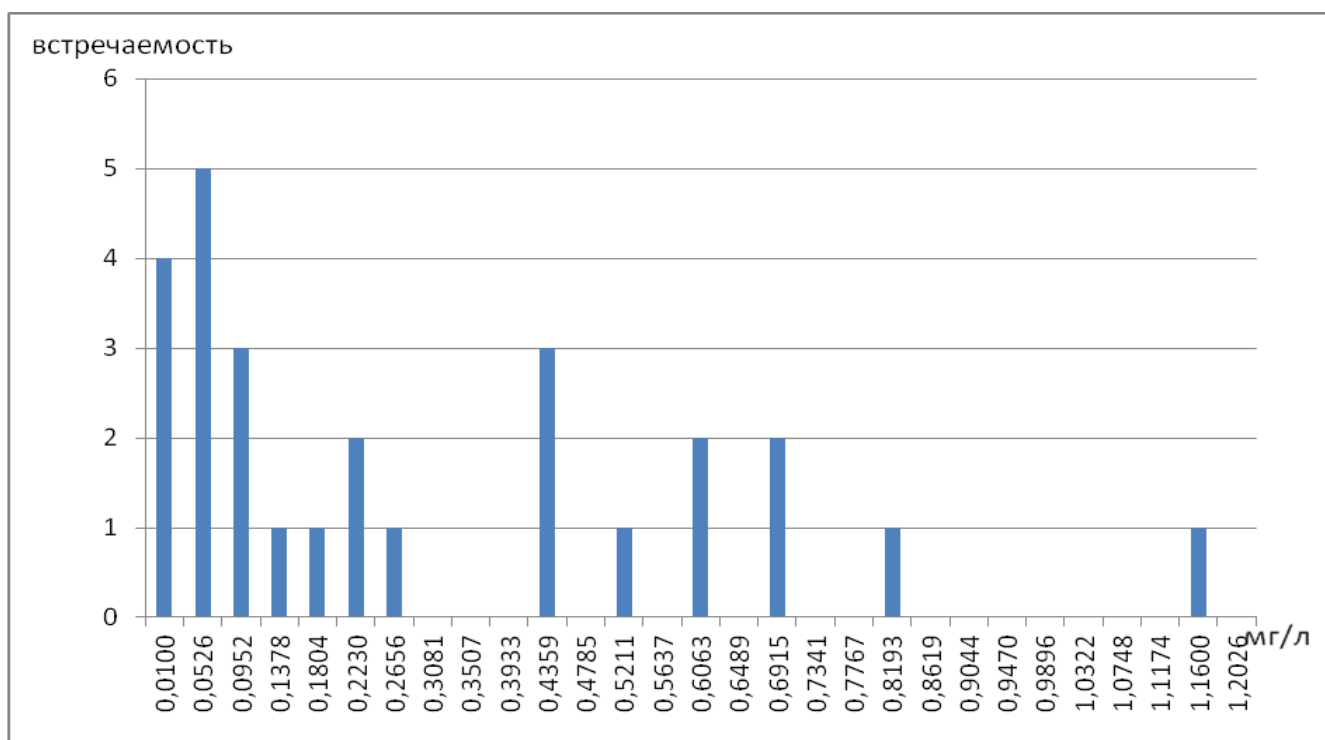


Рис. 1. Содержание марганца в подземных водах Республики Дагестан

На прогрессирующее мышьяковистое загрязнение района исследования также оказывает влияние ежегодно нарастающий темп эксплуатации артезианских скважин. В результате такой бессистемной и бесконтрольной эксплуатации водоносных горизонтов и ухудшения технического состояния скважин (более 60% скважин прошли амортизационный срок, но продолжается их активная эксплуатация) происходит смешивание подземных вод с

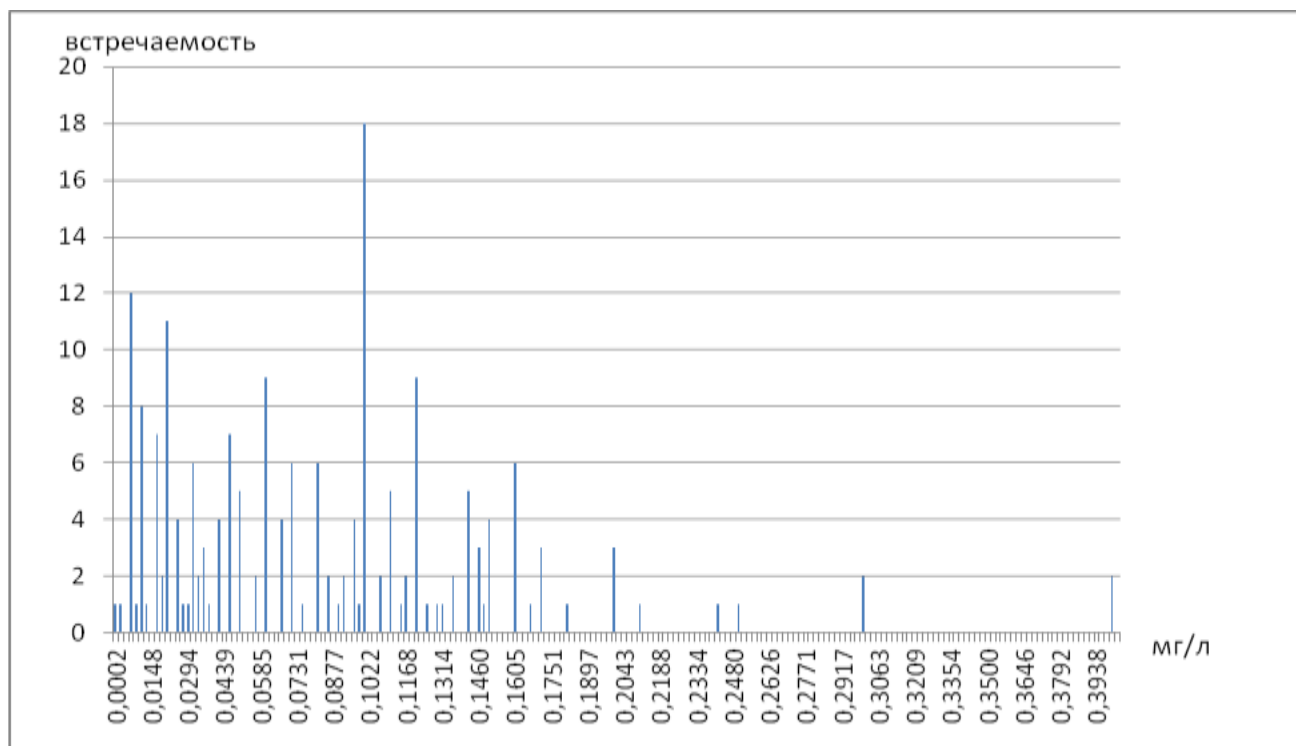


Рис. 2. Содержание мышьяка в образцах питьевой подземной воды Республики Дагестан

нижезалегающих пластов, содержащих токсичные элементы, с вышезалегающими пресными подземными водами продуктивных горизонтов.

Вследствие этого происходит рост минерализации, ухудшение химического состава, в частности увеличение концентраций мышьяка и других токсичных элементов. Выявленное повышенное содержание мышьяка в водах артезианского бассейна является региональной геохимической особенностью данной территории.

Таким образом, качественный анализ подземных вод исследуемого региона выявил повышенные значения жесткости и дефицит йодидов в водах горного Дагестана и повышенные концентрации мышьяка в водах его равнинной части. А основными гидрогеохимическими аспектами формирования подземных вод являются природные факторы, а именно особенности геологического строения территории.

Список литературы:

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Arsenic Toxicological Profile. Atlanta, GA: ATSDR. -2007. Available at: <http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=22&tid=3>.

Абдулмуталимова Т.О., Рамазанов О.М., Алхасов А.Б., Газалиев И.М. Оценка качества подземных вод, используемых в хозяйственно-питьевых целях в Республике Дагестан. Юг России: экология, развитие. 2023;18(2):92-101. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-92-101>

Кондаков В.М., Газалиев И.М., Курбанова Л.М., Ибаев Ж.Г. Геологические аспекты формирования макро- и микрокомпонентного состава подземных вод Терско-Кумского артезианского бассейна в пределах Дагестана // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. 2019. №4 (79). С. 5-20.

Курбанов М.К. Гидрогеоэкологическая программа «Родник. – Ресурсы подземных вод Терско-Кумского артезианского бассейна и пути их рационального использования, предотвращения процессов загрязнения и истощения» на 2003–2008 гг. // Геоэкологические проблемы освоения

и охраны ресурсов подземных вод Восточного Кавказа. – Мат-лы научно-практ. конф-и ИГ ДНЦ РАН. Вып 49. – Махачкала, 2003.

Салихов Ш. К., Яхияев М. А., Луганова С. Г., Атаев М. Г., Курбанова З. В., Алиметова К. А. "Эндемический зоб в Дагестане как результат дефицита йода и селена в объектах ее биосферы" Вестник российских университетов. Математика, vol. 19, no. 5, 2014, pp. 1729-1732;

Самедов Ш. Г. Закономерности зонального формирования и размещения подземных вод Восточного Предкавказья (на примере Дагестана) // Записки Горного института. 2011. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zakonomernosti-zonalnogo-formirovaniya-i-razmescheniya-podzemnyh-vod-vostochnogo-predkavkazy-na-primere-dagestana> (дата обращения: 10.02.2026).

УДК 578.52

ОЦЕНКА НА ГЕНОМНОМ УРОВНЕ ПОТЕНЦИАЛА БАКТЕРИОФАГОВ *MICROCYSTIS* ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦВЕТЕНИЯ ВОДЫ

Бесараб Н.В., Климович И.Д., Самусев Т.В.

Белорусский государственный университет, биологический факультет, Минск, Беларусь,
13natal0990@gmail.com

Аннотация. Представители рода *Microcystis* – одни из самых распространенных цианобактерий, вызывающих цветение воды. Потенциальными агентами контроля цветения воды могут служить цианофаги. В настоящее время в базе данных (БД) GenBank депонирован ряд геномов выделенных цианофагов. В работе будет приведен анализ с помощью инструментов биоинформатики пригодности цианофагов для регуляции численности цианобактерий.

Ключевые слова: цветение воды, цианобактерии, цианофаги, микроцистин, *Microcystis*, геномы бактериофагов

Согласно исследованиям цианобактериальных сообществ водных объектов представители рода *Microcystis* являются одними из преобладающих цианобактерий (Михеева, 2021; Кутявина и др., 2024; Дрозденко и др. 2022; Grasso et al., 2022). Цианобактерии известны продукцией токсинов, превалирующим среди которых в пресной воде является гепатотоксин микроцистин. Микроцистин главным образом продуцируется цианобактериями таких родов, как *Anabaena*, *Microcystis*, *Planktothrix* и *Nostoc* (Rantala et al., 2006), и в наибольшей степени цианобактериями вида *M. aeruginosa* (Wu et al., 2019). К настоящему времени обнаружено более 100 вариантов молекул микроцистина, отличающихся вариabельными аминокислотами (Wu et al., 2019). Микроцистин образуется комплексами нерибосомальных пептидных синтетаз, закодированных в кластере генов биосинтеза микроцистина *mcu*. Нужно отметить, что в водоемах одновременно встречаются как токсичные штаммы (с генами *mcu*), так и нетоксичные штаммы (без генов *mcu*) родов-продуцентов микроцистина (Rantala et al., 2006). Полные последовательности генов *mcu* доступны для *M. aeruginosa* PCC7806, *M. aeruginosa* K-139, *P. agardhii* NIVA-CYA 126/8, *Anabaena* sp. штамма 90 (Mbedi et al., 2005).

Токсичные цветения воды приводят к отравлениям животных и человека, результатом которых может быть летальный исход. Цианотоксины признаны одной из самых смертоносных групп известных биотоксинов (Svirčev et al., 2019). Изменение климата и увеличение уровня эвтрофикации водоемов усугубляет проблему всплеск численности цианобактерий, в связи с чем необходимы эффективные подходы контроля цветения воды. Цианофаги, которые способны специфично элиминировать цианобактерии, могут служить дополнением или альтернативой традиционным способам борьбы с цианобактериальным цветением воды (химическим агентам, физическим методам, биологическим методам с использованием растений-антагонистов), которые имеют свои издержки (Guo et al., 2024). Для разработки эффективных средств контроля вредоносного цветения на их основе целевые цианофаги должны соответствовать ряду критериев. К ним относятся: литический тип жизненного цикла, обеспечивающий прямое уничтожение клеток-хозяев; отсутствие в геноме генов антибиотикорезистентности и детерминант токсигенности для минимизации экологических рисков; а также термостабильность и устойчивость к колебаниям pH в диапазонах, характерных для эвтрофных водоемов, что гарантирует сохранение инфекционной активности в природных условиях (Anam and Ahn, 2024; Zhang et al., 2022).

Целью настоящей работы являлась оценка пригодности известных цианобактериофагов для контроля развития популяции цианобактерий рода *Microcystis*. В задачи работы входил анализ депонированных в БД GenBank геномов бактериофагов *Microcystis* с помощью инструментов биоинформатики на наличие генов антибиотикорезистентности, генов синтеза микроцистина, а также для предсказания жизненного цикла бактериофагов.

Биоинформатическими инструментами для исследования служили ПО платформы PhageGE (https://jason-zhao.shinyapps.io/PhageGE_Update/) для определения типа жизненного цикла, ПО RGI Resistance Gene Identifier (<https://card.mcmaster.ca/analyze/rgi>) для предсказания генов антибиотикорезистентности (генов AMP). Для обнаружения генов биосинтеза микроцистина проводили поиск с помощью инструмента BLASTP гомологов белков, кодируемых кластером генов *msc* бактерии *M. aeruginosa* PCC7806 (Straub et al., 2011). Последовательности геномов цианобактериофагов взяты из БД Nucleotide (NCBI).

В работе было проанализировано 42 генома цианобактериофагов *Microcystis*, опубликованных в БД GenBank на начало января 2026 г. (запрос для поиска в БД Nucleotide (NCBI): “*Microcystis* phage”). На рисунке 1 представлено происхождение изолятов цианобактериофагов, в таблице 1 приведены полученные нами сведения о генетической информации цианобактериофагов, имеющие значение при разработке цианофаговых средств контроля бактериальных популяций.



Рис. 1. Происхождение бактериофагов *Microcystis*, геномы которых представлены в БД GenBank

Примечание: Н/д – нет данных

Таблица 1. Сведения о генетической информации цианобактериофагов

№	Фаг <i>Microcystis</i>	Код доступа в БД GenBank	Размер генома, п.н.	Жизненный цикл (PhageGE): прогноз, балл	Гены AMP (RGI Resistance Gene Identifier)
1	MaMV-DC	NC_029002.1, KF356199.1	169 223	Литический, 0,708	Н/о
2	vB_MaeS-yong1	MT855965.1	43 665	Лизогенный, 0,992	Н/о
3	Mvi-Yong1342-1	PP496355.1	41 005	Лизогенный, 0,996	Н/о
4	Mwe-Yong1318-1	OR083034.1	43 641	Лизогенный, 0,992	Н/о
5	Mae-JY35	PP438426.1	42 400	Лизогенный, 0,910	Н/о
6	Mel-JY34	PP438425.1	44 433	Литический, 0,866	Н/о
7	Mel-JY33	PP438424.1	47 173	Литический, 0,962	Н/о
8	Mwe-JY31	PP438423.1	22 207	Лизогенный, 0,908	Н/о
9	Mae-JY30	PP438422.1	61 694	Лизогенный, 0,788	Н/о
10	Mae-JY29	PP438421.1	37 236	Лизогенный, 0,694	Н/о

11	Mae-JY28	PP438420.1	40 271	Литический, 0,992	Н/о
12	Mwe-JY26	PP438418.1	101 250	Лизогенный, 0,998	Н/о
13	Mwe-JY25	PP438417.1	41 316	Лизогенный, 0,948	Н/о
14	Mae-JY24	PP438416.1	43 641	Лизогенный, 0,992	Н/о
15	Mae-JY22	PP438414.1	41 362	Литический, 0,736	Н/о
16	Mvi-JY20	PP438412.1	107 975	Литический, 0,892	Н/о
17	Mwe-JY13	PP438406.1	41 296	Литический, 0,956	Н/о
18	Ma-LMM01	NC_008562.1, AB231700.1	162 109	Лизогенный, 0,598	Н/о
19	Me-ZS1	MK069556.2	49 665	Литический, 0,948	Н/о
20	Mel-Yong916-1	OQ560327.1	171 051	Литический, 0,792	Н/о
21	MaMV-DL02	PP681324.1	177 212	Лизогенный, 0,612	Н/о
22	MaMV-DL01	PP681323.1	177 213	Лизогенный, 0,612	Н/о
23	MaMV-CH02	PP681322.1	172 789	Литический, 0,672	Н/о
24	MaMV-CH01	PP681321.1	171 437	Литический, 0,686	Н/о
25	Mae-JY09	PP395641.1	38 976	Лизогенный, 0,960	Н/о
26	Mwe-JY08	PP395640.1	45 453	Лизогенный, 0,564	Н/о
27	Mwe-JY07	PP395639.1	58 068	Лизогенный, 0,956	Н/о
28	Mwe-JY05	PP395638.1	71 137	Лизогенный, 0,950	Н/о
29	Mae-JY04	PP395637.1	40 260	Литический, 0,992	Н/о
30	Mel-JY03	PP395636.1	40 253	Лизогенный, 0,740	Н/о
31	Mae-JY02	PP395635.1	37 464	Лизогенный, 0,728	Н/о
32	Mel-JY01	PP395634.1	190 001	Литический, 0,868	Н/о
33	MaAM05	MW495066.1	273 876	Лизогенный, 0,604	Н/о
34	MJing1	OQ540923.1	42 068	Лизогенный, 1,000	Н/о
35	Mae-Yong924-2	MZ570427.1	40 438	Лизогенный, 0,996	Н/о
36	Mae-Yong1326-1	OP028995.1	48 822	Лизогенный, 0,968	Н/о
37	vB_MweS-yong2	OM681334.1	44 530	Литический, 0,886	Н/о
38	Mea-Yong924-1	MZ447863.1	40 325	Лизогенный, 0,996	Н/о
39	MinS1	MZ923504.1	49 966	Лизогенный, 0,998	Н/о
40	Mwe-Yong1112-1	MZ436628.1	39 679	Лизогенный, 0,858	Н/о
41	MaeS	MT362618.1	79 995	Лизогенный, 1,000	Н/о
42	MACPNOA1	KY697807.1	42 473	Лизогенный, 1,000	Н/о

Примечание: Н/о – не обнаружено.

Проведенный анализ 42 геномов бактериофагов *Microcystis* позволил идентифицировать группу фагов, наиболее перспективных для разработки средств контроля. Среди всех исследованных геномов ни в одном не были обнаружены гены антибиотикорезистентности. При сравнении белковых последовательностей десяти генов кластера *msu* с помощью поиска BLASTP с последовательностями цианобактериофагов родственный белок обнаружен только для одного бактериофага *Microcystis* MaAM05. Последовательность белка бактериофага была идентична на 28,28% (покрытие 32%) последовательности белка MscH, экспортера микроцистина (Pearson et al., 2004). Полученные данные свидетельствуют в пользу минимальной вероятности опосредованного фагами распространения токсигенности. При этом инструмент PhageGE прогнозирует литический тип

жизненного цикла для 16 из 42 проанализированных фагов (например, MaMV-DC, Me-ZS1, Mel-JY33, Mvi-JY20).

Таким образом, в результате скрининга выделена группа из не менее чем 16 литических фагов, которые не содержат маркеров непригодности (генов АМР и полноценных генов синтеза микроцистина) и могут рассматриваться как кандидаты для дальнейшего экспериментального изучения и разработки целевых препаратов для контроля цветения воды.

Список литературы:

Anam G.B., Ahn Y.H. The interplay of low H₂O₂ doses, lytic cyanophage, and *Microcystis aeruginosa*: implications for cyanobacterial bloom control and microcystin production/release // Sci Total Environ. 2024. Vol. 916. P. 170327. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.170327

Drozdenko T.V., Aleksandrova S.M., Antal T.K., Tikhomirova E.I. Structural indicators and toxic species of cyanobacteria of Pskov Lake // Povolzhskiy J Ecol. 2022. Vol. 4. P. 388-399. doi:10.35885/1684-7318-2022-4-388-399

Grasso C.R., Pokrzywinski K.L., Waechter C., et al. A review of cyanophage–host relationships: highlighting cyanophages as a potential cyanobacteria control strategy // Toxins. 2022. Vol. 14, № 6. P. 385. doi:10.3390/toxins14060385

Guo Y., Dong X., Li H., Tong Y., Liu Z., Jin J. Cyanophage engineering for algal blooms control // Viruses. 2024. Vol. 16, № 11. P. 1745. doi:10.3390/v16111745

Kutyavina T.I., Sysolyatina M.A., Ashikhmina T.Ya. Distribution of toxigenic cyanobacteria in water bodies of the East European Plain // Theor Appl Ecol. 2024. Vol. 3. P. 154-164. doi:10.25750/1995-4301-2024-3-154-164

Mbedi S., Welker M., Fastner J., Wiedner C. Variability of the microcystin synthetase gene cluster in the genus *Planktothrix* (*Oscillatoriales*, *Cyanobacteria*) // FEMS Microbiol Lett. 2005. Vol. 245, № 2. P. 299-306. doi:10.1016/j.femsle.2005.03.020

Pearson L.A., Hisbergues M., Börner T., Dittmann E., Neilan B.A. Inactivation of an ABC transporter gene, *mcyH*, results in loss of microcystin production in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* PCC 7806 // Appl Environ Microbiol. 2004. Vol. 70, № 11. P. 6370-6378. doi:10.1128/AEM.70.11.6370-6378.2004

Rantala A., Rajaniemi-Wacklin P., Lyra C., et al. Detection of microcystin-producing cyanobacteria in Finnish Lakes with genus-specific microcystin synthetase gene E (*mcyE*) PCR and associations with environmental factors // Appl Environ Microbiol. 2006. Vol. 72, № 9. P. 6101-6110. doi:10.1128/AEM.01058-06

Straub C., Quillardet P., Vergalli J., De Marsac N.T., Humbert J.F. A day in the life of *Microcystis aeruginosa* strain PCC 7806 as revealed by a transcriptomic analysis // PLoS ONE. 2011. Vol. 6, № 1. P. e16208. doi:10.1371/journal.pone.0016208

Svirčev Z., Lalić D., Bojadžija Savić G., et al. Global geographical and historical overview of cyanotoxin distribution and cyanobacterial poisonings // Arch Toxicol. 2019. Vol. 93, №9. P. 2429-2481. doi:10.1007/s00204-019-02524-4

Wu X., Hou L., Lin X., Xie Z. Application of novel nanomaterials for chemo- and biosensing of algal toxins in shellfish and water. In: Novel Nanomaterials for Biomedical, Environmental and Energy Applications. Elsevier; 2019. P. 353-414. doi:10.1016/B978-0-12-814497-8.00012-6

Zhang S., He X., Cao L., Tong Y., Zhao B., An W. A novel wide-range freshwater cyanophage MinS1 infecting the harmful cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* // Viruses. 2022. Vol. 14, №2. P. 433. doi:10.3390/v14020433

Михеева Т.М. Первые исследования наличия цианотоксинов в водоемах и водотоках Беларуси // Журнал Белорусского Государственного Университета. Экология. 2021. № 1. С. 52-62. doi:10.46646/2521-683X/2021-1-52-61

УДК 504.45(470.324)

**ОЦЕНКА ВКЛАДА ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ РИСКА В
ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД КАК ОБЪЕКТА
ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Боева А.С., Потапова Э.Г., Баранова А.А.

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, coriandre@rambler.ru

Аннотация. Загрязнение подземных вод обусловлено изменением их химического состава, приводящее к ухудшению качества вод. В работе проведен анализ условий формирования химического состава подземных вод Воронежской области и выявления причин повышенного содержания приоритетных загрязнителей в водоносных комплексах. Гидрохимическое состояние подземных вод на территории региона характеризуется высокими значениями солей жесткости, железа, марганца и нитратами. Установлено, что на условия формирования химического состава подземных вод значительный вклад оказывают как природные, так и техногенные факторы риска.

Контролирующим органам региона рекомендуется усилить мониторинг качества питьевой воды, а жителям урбанизированных и сельских поселений следует использовать бытовые фильтры для дополнительной очистки воды.

Ключевые слова: подземные воды, условия формирования химического состава вод, водоносные комплексы, природные и антропогенные источники, административные территории.

В пределах Воронежской области подземные воды являются главным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения, поэтому проведение экологического мониторинга с целью оценки качества подземных водоисточников является одной из актуальных задач региона.

Загрязнение подземных вод обусловлено изменением их химического состава, вызванное поступлением посторонних для природных условий веществ, приводящих к ухудшению качества вод. Мониторинг подземных вод в пределах Воронежской области (наблюдательная сеть включает 113 пунктов) возложен на Воронежский территориальный центр Государственного мониторинга геологической среды (ВТЦ ГМГС), который является структурным подразделением ФГУ ГП «Воронежгеология».

Гидрохимическое состояние подземных вод на территории Воронежской области характеризуется повышенными значениями солей *жесткости, железа, марганца* природного происхождения и *нитратами* антропогенного загрязнения (Справка..., 2020)

Попытаемся проанализировать и обобщить имеющийся научно-исследовательский опыт изучения условий формирования химического состава подземных вод Воронежской области (Смирнова, Позднякова, 2013; Бочаров и др., 2010; Бугреева, 1997 и др.), и установить причины повышенного содержания вышеперечисленных компонентов в водоносных комплексах.

На территории 14 административных единиц области питьевое водоснабжение на 74.1% обеспечивается из *неоген-четвертичного* водоносного комплекса; на территории 17 муниципалитетов 18.7% из *мелового* комплекса и в лишь пределах Семилукского и Калачеевского районов наибольшее участие в обеспечении питьевой водой принадлежит *девонскому* комплексу, что составляет 4.6% от общего водопотребления по региону; на долю *архейско-протерозойского* водоносного комплекса приходится 2.3% (Бочаров и др., 2010).

Причины повышенной жесткости воды. Влияние вмещающих пород на химический состав подземных вод зависит от степени их растворимости в воде. Наиболее водорастворимыми являются галогены, затем сульфатные и карбонатные породы. Из

перечисленных на территории области, присутствуют карбонатные породы, слагающие меловые и девонские водоносные комплексы. При растворении карбонатных пород в воде образуется повышенное содержание малорастворимых солей жесткости, приводящих к камнеобразованию в организме (Ревич, 2001).

По данным Управления Роспотребнадзора для централизованных источников (*распределительная сеть*) за 2025 год установлено, что 6 районов области (Таловский, Каширский, Кантемировский, Поворинский, Подгоренский, Ольховатский) имеют значения общей жесткости выше 10 ммоль/л; 12 районов – 7–10 ммоль/л и 15 районов – меньше 7 ммоль/л. При этом среднее значение по региону составляет 7.84 ммоль/л (при норме ≤ 7 ммоль/л).

Причины повышенной концентрации железа в воде. Воронежская область и г. Воронеж расположены в природной зоне избыточного увлажнения, характеризующейся повышенным содержанием железа. Так например, повышенные концентрации железа (при норме ≤ 0.3 мг/л) выявлены в 14 районах области (Ольховатский, Панинский, Калачеевский, Подгоренский, Семилукский, Таловский, Верхнехавский, Бобровский, Терновский, Рамонский, Поворинский, Кантемировский, Хохольский, Новохоперский), а подземные воды г. Воронежа отличаются повышенным содержанием как железа (1.5–2.5 ПДК), так и марганца (2–5 ПДК). Данные элементы выделяют в отдельную группу природно-техногенных аномалий, т.е. их присутствие обусловлено как природными, так и антропогенными факторами, однако, степень каждого из них установить весьма сложно.

Природные источники. Основным источником поступления железа в природные воды являются процессы химического выветривания горных пород, сопровождающиеся их механическим разрушением и растворением. В результате взаимодействия органических и минеральных веществ, содержащихся в природных водах, образуется целый комплекс соединений железа, которые могут присутствовать либо в нерастворимой форме в виде взвешенных в воде твердых минеральных частиц, либо в виде растворимых солей.

Антропогенные источники. Например, в прибрежной левобережной зоне в районе ТЭЦ-1 г. Воронежа сформировалась гидрогеохимическая аномалия тяжелых металлов, характеризующаяся значительным ростом концентраций микроэлементов, в том числе содержание Fe достигает 0.5–0.7 мг/л, Mn – 0.2–0.45 мг/л. Техногенными источниками являются: хозяйственно-бытовые и промышленные стоки, как с правобережья, так и с левобережья Воронежского водохранилища; автомобильные стоянки и автозаправочные станции, расположенные непосредственно вблизи водохранилища, в его охранной зоне; мощный золошлаковый отвал, расположенный непосредственно на берегу и размываемый дождевыми и талыми водами.

Избыток железа нарушает функцию центральной нервной системы, усугубляя психические расстройства. Оно нередко становится причиной развития дерматитов, и аллергических реакций (Ревич, 2001).

Причины повышенной концентрации марганца в воде. Марганец является постоянным компонентом подземных вод неоген-четвертичного водоносного комплекса, используемого в целях питьевого водоснабжения г. Воронежа.

Природные источники. На основании имеющихся данных М. Н. Бугреевой о возможных источниках поступления марганца в подземные воды (Бугреева, 1997), можно сделать вывод, что зарегулирование реки Воронеж, т.е. использование водных ресурсов путем строительства плотины и водохранилища, привело к изменению естественных процессов миграции марганца в системе «придонная вода Воронежского водохранилища – иловые воды – донные отложения», которые и являются основными поставщиками ионов марганца на водозаборные участки инфильтрационного типа.

Антропогенные источники. Река Воронеж впадает в Воронежское водохранилище в 3 км к северу от окраины города, принося со своими водами разные формы марганца, источником поступления которых являются стоки предприятий г. Липецка и особенно

металлургического комбината, расположенного в 100 км от места перехода реки в водохранилище. Так, например, при норме 0.1 мг/л в зависимости от глубины, содержание марганца в водах р. Воронеж изменяется в диапазоне от 0.07 до 0.39 мг/л.

Марганец относится к тяжелым металлам, в больших дозах вызывает отравление, которое выражается в развитии мышечной атрофии и возникновении аллергии. Он способен воздействовать на легкие, печень и сердце, а у кормящих женщин остановить лактацию. Длительное действие марганца на организм может спровоцировать рак и болезнь Паркинсона (Ревич, 2001).

Причины повышенного содержания нитратов в воде. Ежегодно возрастает роль антропогенного фактора в формировании состава подземных вод, в результате чего на объектах ЖКХ (например, водозаборные скважины) наблюдается изменение их химического состава и минерализации.

Одной из доминирующих причин избыточного содержания нитратов в питьевых водоносных горизонтах является активное сельскохозяйственное освоение территорий, в результате почвы загрязняются азотными удобрениями, что приводит к накоплению в инфильтрующихся водах нитратов во много раз превышающие фоновые концентрации. С полей они попадают в грунтовые воды, а оттуда – в водозаборные скважины. Причем, чем ближе к скважине расположены поля или огороды, тем выше риск заражения воды нитратами. Так, например, по результатам исследований в период с 2024–2025 годы на территории 14 муниципальных районов и 3 городских округов Воронежской области (около 50% территории региона) выявлено «нитратное загрязнение» подземных вод.

Избыточное присутствие нитратов в питьевой воде способствует образованию опасного вещества в крови – метгемоглобина, который вызывает кислородное голодание. Снижение уровня гемоглобина приводит к ухудшению работы сердечной и сосудистой системы, закупорке сосудов, инсульту. Недостаточность кислородного питания вызывает сильные головные боли, мигрени и тошноту (Красникова, 2025).

Таким образом, анализ региональных геоэкологических и гигиенических исследований показал, что на 34 административных территориях Воронежской области подземные воды как источник хозяйственно-питьевого водоснабжения имеют неудовлетворительное качество. На условия формирования химического состава подземных вод значительный вклад оказывают как природные, так и техногенные факторы риска.

В сложившихся обстоятельствах контролирующим органам региона *рекомендуется* усилить мониторинг качества питьевой воды. Жителям урбанизированных и сельских поселений следует использовать бытовые фильтры для дополнительной очистки воды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00219, <https://rscf.ru/project/25-17-00219/>

Список литературы:

- Бочаров В.Л., Строгонова Л.Н., Овчинникова Е.С. Проблемы изучения и использования ресурсов подземных питьевых вод Воронежской области // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. 2010. № 1. С. 243-251.
- Бугреева М. Н. Экологическая геохимия марганца в подземных, поверхностных водах и донных отложениях района Воронежского водохранилища: автореферат дис. ... канд. геолого-минералог. наук: 04.00.02 / Воронежский ун-т. Саратов, 1997. 24 с.
- Красникова А.А., Клепиков О.В., Механтьев И.И., Прожорина Т.И., Мамчик Н.П., Занина М.Я. Оценка риска для здоровья от нитратного загрязнения на территории Воронежской области // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 8. С. 70–77.

Ревич Б.А. Загрязнение окружающей среды и здоровье населения: Введение в экологическую эпидемиологию. М.: МНЭПУ, 2001. 235 с.

Смирнова А.Я., Позднякова Н.И. Пресные подземные воды. Распространение водоносных горизонтов и комплексов // Эколого-географический атлас-книга Воронежской области. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та. 2013. С. 104-107.

Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Воронежской области на 15.06.2020 г./ФГБУ «Гидроспецгеология» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 26.12.2019 г. Воронеж, 2020. 11с.

УДК 556.554

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОД В ВЕРШИНЕ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ

Волкова З.В.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, zinaL@bk.ru

Аннотация: на основе ретроспективного анализа данных ГСН Росгидромета и экспедиционных исследований ИВП РАН рассматриваются многолетние изменения ряда приоритетных загрязняющих веществ (ЗВ) в воде в вершине дельты Волги в период 1977–2014 гг. и роль стока реки в формировании качества ее вод.

Ключевые слова: загрязнение, потоки, загрязняющие вещества, класс качества вод, тенденции.

Современные методы анализа загрязнения речных вод с использованием гидрохимических показателей вод широко применяются в гидрологии и экологии. Целью работы является оценка загрязнения вод в вершине дельты р. Волги с использованием ретроспективного анализа данных Росгидромета и экспедиционных исследований ИОАН, ИВП РАН, КаспНИРХ на р. Волге и оценка роли приоритетных ЗВ и водного стока реки в его формировании.

Важное значение в формировании экологического состояния и качества вод Нижней Волги играют гидрохимические, гидрофизические, гидробиологические и др. процессы, связанные как с природными, так и с антропогенными факторами. Значительные изменения климатических условий и хозяйственной деятельности в последние годы привели к заметным изменениям качества вод на ряде участков (Обзор..., 2022, 2024).

Как следует из табл. 1, диапазон изменения класса качества вод по гидрохимическим показателям в створе Верхнее Лебяжье составляет от **2а** (чистые воды) до **5а** (весьма грязные). УВ загрязнение по-прежнему относится к приоритетным ЗВ, не смотря на существенное снижение их концентраций в водах р. Волги (ЗВ в водах Волжско-Каспийского бассейна), обусловленным улучшением состояния качества вод на ряде участков Волги.

Таблица 1. Изменение класса качества воды р. Волги в створе Верхнее Лебяжье в условиях различной обеспеченности стока в период 1977–2014 гг.

Показатель	Обеспеченность, %				
	10	25	50	75	90
Сток Волги, км куб.	312	284	256	227	201
Медь, мкг/л	12.3	9.3	6.5	4.5	3.3
Класс качества вод	4б	4а	4а	3б	3б
Цинк, мкг/л	57	40	25	14	7
Класс качества вод	4б	4б	4а	4а	3б
УВ, мг/л	0.50	0.30	0.15	0.06	0.04
Класс качества вод	5а	5а	5а	4б	4а
БПК ₅ , мгО ₂ /л	4.2	3.8	3.4	2.9	2.6
Класс качества вод	4б	4а	4а	4а	4а
Взвешенные вещества, мг/л	42	31	21	14	9
Класс качества вод	4а	4а	3б	2б	2а
Фенолы, мкг/л	4.9	3.6	2.4	1.5	1.0
Класс качества вод	4б	4б	4б	4б	4б

Как свидетельствуют полученные данные, более стабилен класс качества вод по фенолам: сильно загрязненные воды (**4б**) для всех величин обеспеченности. По показателю

БПК₅ он сохраняется на уровне умеренно загрязненной (**4а**), за исключением 10% обеспеченности (сильно загрязненная (**4б**)). По меди и по цинку класс качества вод изменяется от слабо загрязненной (**3б**) до умеренно загрязненной (**4а**) и сильно загрязненной (**4б**). По УВ: от умеренно загрязненной (**4а**) до весьма грязной (**5а**). При этом следует отметить, что для диапазона значений обеспеченности от 10 до 50% класс качества вод по УВ соответствует категории «весьма грязные воды».

Анализ уровня загрязнения вод Нижней Волги с использованием кривых обеспеченности гидрохимических показателей позволил получить данные об особенностях формирования качества вод при различной водности Волги и выявить характерные тенденции изменения для различных элементов.

В зависимости от водности отмечаются существенные изменения потоков загрязняющих веществ в Каспийское море (табл. 2.).

Таблица 2. Изменение потоков ЗВ в створе Верхнее Лебяжье в многоводные, маловодные и средневодные годы (период 1977–2014 гг.)

Водность года	Потоки				
	Сu	Zn	УВ	БПК ₅	Фенолы
	т/год		тыс. т/год		
Многоводные годы	2475±1179	10227±4870	70.9±57	1020±223	1.40±1.15
Маловодные годы	1387±714	4422±3725	45.5±49	769±134	0.66±0.28
Средневодные годы	1528	7056	37.2	791	0.65
Отношения потоков: многоводн./маловодн. годы	1.8	2.3	1.6	1.3	2.1

Как видно из табл. 1 и 2 различия в концентрациях ЗВ в многоводные и маловодные периоды более значительны, чем в потоках. Различие для концентраций Zn составляет – 2.3 раза, фенолов – 2.1 раза, Cu – 1.8 раза. Для УВ соотношение для многоводных и маловодных лет составляет 1.6 – для БПК₅ – 1.3 раза.

Рассмотрение связей потоков рассматриваемых приоритетных загрязняющих веществ со стоком р. Волги в период 1977-2014 гг. показало, что более тесные связи потоков веществ с объемом стока отмечены для БПК₅ (корреляционное отношение $R^2=0.35$), для потока меди ($R^2=0.32$). Более низкие значения R^2 отмечены для УВ (0.18) и цинка (0.24). Значительный разброс точек на графиках связи свидетельствует о высокой изменчивости и неравномерности гидрохимических показателей. Невысокие отклонения прослеживаются на нижних участках графиков, где величины объема стока невелики.

Полученные различия в концентрациях и потоках ЗВ, классах качества вод, величинах превышений ПДК для многоводных и маловодных лет, их зависимости от обеспеченности объема стока дают представление о тенденциях в развитии процессов загрязнения водных масс при изменении климатических факторов, с которыми связана водность года.

Следует отметить, что снижение концентраций ЗВ в воде более ярко выражена в УВ, по сравнению с Zn, Cu.

Выводы

Зависимость водности от климатических факторов приводит к существенным изменениям концентраций элементов и потоков загрязняющих веществ в Каспийское море. Анализ изменения концентраций и потоков загрязняющих веществ в створе Верхнее Лебяжье для многоводных и маловодных лет периода 1977-2014 гг. показал, что различия в концентрациях загрязняющих веществ более значительны, чем в потоках элементов. Наибольшее различие отмечается в потоках цинка (2,3 раза), фенолов (2,1), меди (1,8), УВ (1,6). Более высокие значения потоков в многоводные периоды по сравнению с маловодными

свидетельствуют о значительной роли климатических факторов в формировании загрязнения вод Нижней Волги и необходимости их учета при прогнозировании качества вод.

Таким образом, анализ влияния объема речного стока на приоритетные гидрохимические показатели на участках Нижней Волги в период с 1977 по 2014 гг. показал, что это влияние прослеживается как в концентрациях, так и в потоках ЗВ. Отмечена тенденция снижения концентраций ЗВ в воде Волги с 2000 гг.

Список литературы:

Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Монахов С.К. Динамика потоков загрязняющих веществ в дельте р. Волги // Вода: химия и экология. 2011. № 4. С. 9–17.

Волкова З.В., Бреховских В.Ф. Влияние речного стока на гидрохимические характеристики Нижней Волги // Труды Междунар. науч.-практ. конф. Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Химический состав и качество воды. Пермь, 2013. С. 26–31.

Волкова З.В., Ломова Д.В., Кременецкая Е.Р. Изменения качества вод в речных системах ЕЧР // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды IX науч.-практич. конф. с междунар. участием. (г. Пермь 25–28 мая 2023 г.) Т. 2. Пермь: Пермский национ. исслед. политехнич. университет, 2023. С. 17–22.

Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.П. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. № 4. С. 62–76.

Проблемы качества вод Нижней Волги и Северного Каспия / Отв.ред. В. Ф. Бреховских, Е. В. Островская. М.: Типография Россельхозакадемии, 2013. 300 с.

Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна. Астрахань: Издатель Сорокин Роман Васильевич, 2017. 408 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации 2022. М.: Росгидромет, 2023. 220 с.

Государственный доклад о состоянии загрязнения и об охране окружающей среды Российской Федерации в .2024 г. Минприроды России. ФГБУ-ВНИИ «ЭКОЛОГИЯ». М., 2025. 721 с.

УДК 543.3; 556

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И
МАРГАНЦА В МАЛЫХ РЕКАХ БАССЕЙНА РЕКИ ИШИМ
(ТЮМЕНСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Кревень Ю.О.¹, Ларина Н.С.¹, Ларин С.И.²

¹Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия, yuliakreven@gmail.com

²Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия.

Аннотация. В работе исследуются закономерности распределения Fe и Mn в воде и взвешенном веществе 11 малых рек – притоков р. Ишим. Выявлено повсеместное превышение ПДК_{рх} металлов в воде, обусловленное природными и антропогенными факторами. Установлено, что железо и марганец мигрируют преимущественно во взвешенной форме, значимый вклад в пространственное распределение железа и марганца вносят процессы эвтрофирования на зарегулированных участках рек, а также стоки с заболоченных территорий. Выполнено термодинамическое моделирование форм нахождения металлов в воде.

Ключевые слова: малые реки, железо, марганец, взвешенное вещество, донные отложения, Приишимье

Малые реки играют важную роль в сохранении экологического равновесия и обеспечении локальных территорий водными ресурсами, зачастую являясь единственным источником питьевой воды для населения (Ткачев, Булатов, 2002). Из-за ограниченной способности к естественному самоочищению малые реки подвержены значительному воздействию загрязнителей, что может привести к неблагоприятным экологическим последствиям не только на местном уровне, но и ухудшить качество вод в более крупных водотоках, куда они впадают (Loh P.S., et al., 2021). Особую актуальность представляет оценка содержания Fe и Mn в поверхностных водах Тюменской области, где систематически фиксируются превышения предельно допустимых концентраций (ПДК_{рх}) этих металлов, что связано с геохимической спецификой региона и сильной заболоченностью водосборов (Кревень, 2025, Белоусова, 2023). Цель данного исследования – оценка содержания и форм миграции железа и марганца в малых реках Ишимского бассейна.

Пробы воды были отобраны в августе 2020 г. в 11 притоках р. Ишим, протекающих в зонах подтайги и северной лесостепи (рис. 1). Отобранные пробы фильтровались через беззольный фильтр «синяя лента». Осадок на фильтрах доводили до постоянной массы при температуре 105 °С, озоляли при температуре 550°С и растворяли в 10%-ной HNO₃ для дальнейшего определения кислоторастворимой формы металлов во взвешенном веществе методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Анализ проб воды проводился в соответствии с нормативными документами и рекомендациями (Ларина, 2010). Для оценки форм нахождения металлов в водах исследуемых рек были выполнены термодинамические расчеты в программном комплексе PHREEQC (версия 3) с использованием базы данных WATEQ4f.

Для оценки форм миграции железа и марганца в пробах воды содержание металлов определялось отдельно в растворенной (фильтрат) и взвешенной (осадок) форме (табл. 1)

Содержание водорастворимых форм железа в более крупных малых реках региона (Барсук, Китерня, Карасуль, всего 39 проб) в среднем составило 0.16±0.04 мг/л (медианное – 0.11 мг/л), что превышает ПДК_{рх}=0.1 мг/л. Максимальная концентрация водорастворимого Fe (0.43 мг/л) наблюдалось в верхнем течении р. Карасуль, имеющем болотное питание. Среднее содержание в реках: р. Барсук – 0.05±0.01 мг/л; р. Китерня – 0.10±0.01 мг/л; р. Карасуль – 0.27±0.05 мг/л.

Среднее содержание металла во взвешенной форме (в пересчете на объем воды) во всех исследованных реках (n=68) составило 12.6±3.7 мг/л, медианное – 9.81 мг/л. Максимальное

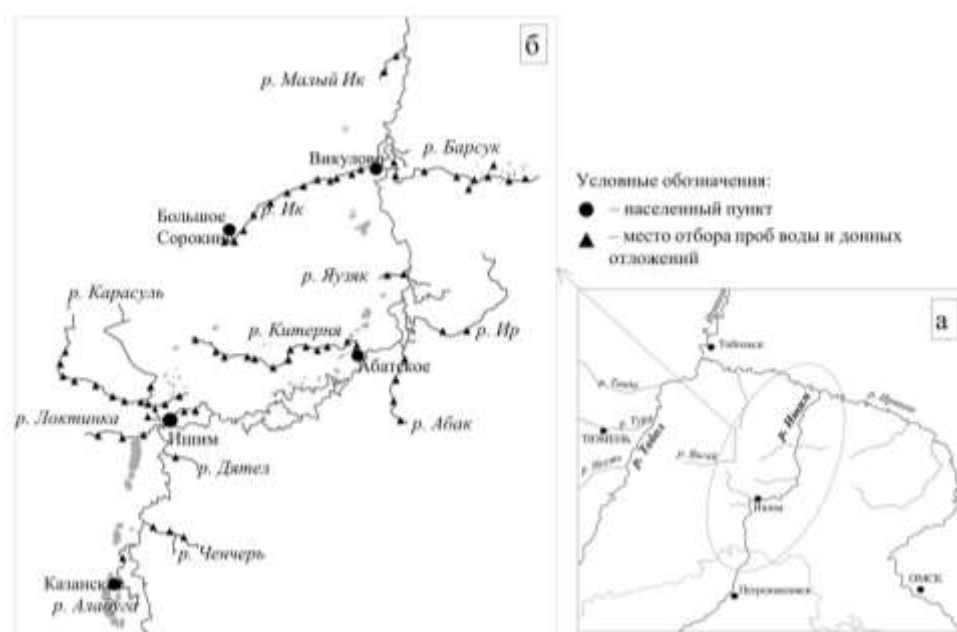


Рис. 1. Местоположение района исследования (а) и карта-схема отбора проб воды и донных отложений на малых реках бассейна р. Ишим(б)

Таблица 1. Общая характеристика распределения железа и марганца в воде и донных отложениях малых рек бассейна р. Ишим ($p=0.95$)

Статистический показатель	Вода, мг/л		ВВ, мг/л	
	Fe	Mn	Fe	Mn
Число измерений	39		68	
Максимум	0.43	0.09	131.1	12.2
Минимум	0.04	0.00	2.27	0.41
Среднее значений	0.16 ± 0.04	0.03 ± 0.01	12.6 ± 3.7	2.66 ± 0.55
Медиана	0.11	0.02	9.81	2.00
Станд. отклонение	0.11	0.03	15.7	2.32
Число выбросов	0	5	3	4

значение (131.1 мг/л) наблюдалось в притоке р. Карасуль – р. Черемшанка и обусловлено близостью с федеральной трассой Тюмень-Ишим.

Среднее содержание водорастворимых форм марганца во всех исследуемых рек составило 0.03 ± 0.01 мг/л (медианное – 0.02 мг/л). Превышение ПДК_{рх}=0.01 мг/л наблюдалось во всех реках, кроме р. Дятел, где полученное значение находилось ниже области определения. Максимальное содержание водорастворимого Mn (0.09 мг/л), аналогично Fe, наблюдалось в верхнем течении р. Карасуль.

Среднее содержания марганца во взвешенной форме во всех исследуемых реках составило 2.66 ± 0.55 мг/л (медианное – 2.00 мг/л). Максимальное содержание Mn было зафиксировано в истоке р. Карасуль (12.2 мг/л) и р. Китежня (11.4 мг/л). Повышенная аккумуляция металла во взвеси в истоке рек также наблюдалась в р. Ченчерь (7.47 мг/л) и р. Абак (3.13 мг/л), что предположительно связано с активными процессами эвтрофирования на данных участках. Аккумуляция в устьевой зоне наблюдалась для р. Локтинка (3.28 мг/л).

По результатам термодинамического моделирования форм нахождения металла в растворенной форме, было установлено, что железо мигрирует преимущественно в виде гидрокомплексов трехвалентного железа, когда как для двухвалентного железа характерна миграция в виде гидрокарбонатных и карбонатных комплексов. Для марганца характерна миграция преимущественно в двухвалентной форме, в виде карбонатных комплексов или

свободных ионов. По результатам статистической обработки полученных данных, для растворенной формы железа наблюдалась значимая положительная корреляция ($r > 0.5$) с содержанием ионов аммония и ионов калия, что указывает на взаимосвязь между содержанием металла и ростом биогенной нагрузки. Данное предположение также подтверждается наличием значимой положительной корреляции между железом и фосфором во взвешенном веществе. Для растворенной и взвешенной формы марганца, значимых корреляций не наблюдалось, что свидетельствует о влиянии большего числа факторов на распределение металла в речных водах.

По результатам определения содержания и форм миграции железа и марганца в воде и взвешенном веществе малых рек Ишимского бассейна было установлено, что мигрируют металлы преимущественно в составе взвеси. Превышение ПДК_{рх} для растворенной формы металлов в среднем наблюдалось в 2 раза. В зонах повышенной аккумуляции, превышение ПДК_{рх} для железа достигало 4ПДК, а для марганца – 9ПДК, при этом отмечена аккумуляция металлов преимущественно в истоке рек. Среди факторов, влияющих на пространственное распределение Fe и Mn, были выделены процессы эвтрофирования на зарегулированных участках рек, а также стоки с заболоченных территорий.

Список литературы:

Белоусова Ю.О., Шуплецова П.А. Формы нахождения и миграции железа и марганца в малых реках Приишимья / Ю. О. Белоусова, П. А. Шуплецова // Химия и химическая технология в XXI веке : Материалы XXIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 85-летию со дня рождения профессора А.В. Кравцова, Томск, 15–19 мая 2023 года. Том 2. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 204-206.

Кревень Ю.О., Ларина Н.С., Ларин С.И. Оценка миграционной способности железа и марганца в донных отложениях Р. Иска (приток Р. Тобол) // Водные и экологические проблемы Обь-Иртышского бассейна: новые вызовы, передовые решения : Сборник материалов научно-практической конференции с международным участием, проходившей в рамках Международного водного форума, Ханты-Мансийск, 15–17 ноября 2024 года. – Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2025. – С. 75-80.

Ларина Н.С., Ларин С.И., Беспоместных С.Г. К вопросу о методах оценки качества вод // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2010. № 7. С. 218–228.

Ткачев Б.П., Булатов В.И. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2002. №64. С. 1-114.

Loh P.S., et al. Monitoring Sediment and Water Chemistry in Small Remote Aquatic Systems in East Sepik Province, Papua New Guinea // Water Air and Soil Pollution. 2021. Vol. 232, Iss. 11, P. 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05359-x>

УДК 556.36

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РОДНИКОВ МАЙКОПСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕЯ

Назаренко О.В.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, ovnazarenko@sfedu.ru

Аннотация. Представлены результаты комплексного геоэкологического исследования родников Майкопского района Республики Адыгея. Оценено их экологическое состояние с применением методики стадий рекреационной дигрессии, а также проанализирована многолетняя динамика химического состава вод. Большинство источников имеет лечебно-столовое или бальнеологическое значение, однако их потенциал подвергается угрозе вследствие антропогенной трансформации прилегающих территорий.

Ключевые слова: родники, химический состав, геоэкологические особенности, Майкопский район, Адыгея

Майкопский район – живописный район, который расположен в предгорьях Северного Кавказа. Он располагает богатыми бальнеологическими ресурсами. Здесь расположены месторождения подземных вод (Назаренко и др., 2020). Родники, как естественные выходы подземных вод, представляют собой значимые природные объекты, выполняющие гидрологические, экологические и рекреационно-бальнеологические функции. В условиях возрастающей антропогенной нагрузки, особенно в рекреационно-освоенных регионах, актуальной задачей становится комплексная геоэкологическая оценка родников, включающая анализ их ресурсного потенциала и устойчивости к внешним воздействиям. Цель данной работы – провести оценку родников в Майкопском районе Республики Адыгея.

Исследования проводились на территории низкогорной части Республики Адыгея в долине реки Белой и ее притоков. Работа основана на данных натурных обследований (Еремина, 2009), а также на анализе литературных и картографических источников (Гидрогеология СССР, 1968; Гальцова, 1999; Еремина, 2009; Зайцева, 2001).

Район исследований расположен в зоне сочленения эпигерцинской Скифской плиты и альпийской складчатой области Большого Кавказа. Рельеф варьирует от расчлененной предгорной равнины до низкогорий Лесистого и Пастбищного хребтов. Климат умеренно-теплый, влажный, с годовым количеством осадков 700-800 мм в предгорьях (Назаренко, 2023).

Гидрогеологические условия территории определяются двумя основными структурами: Азово-Кубанским артезианским бассейном (в равнинно-предгорной части) и Большекавказским гидрогеологическим массивом. Исследованные родники приурочены к трем водоносным комплексам: нижнемеловой (K_1) (район ст. Абадзехской), нижне-среднеюрский ($J_{1.2}$) (п. Никель, ст. Даховская), средне-верхнеюрский ($J_{2.3}$) (п. Каменноостровский) (табл. 1, 2). Родники расположены на высотах 350–695 м. Большинство родников имеют восходящий характер питания, что свидетельствует о разгрузке напорных или слабонапорных вод по тектоническим нарушениям и зонам трещиноватости. Они используются для питьевого и бальнеолечения.

Анализ данных позволяет выделить две основные группы вод:

1. Слабоминерализованные гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные воды кальциево-магниевого и смешанного катионного состава (родники 5, 8, 9). Имеют потенциал как природные столовые воды.

2. Воды повышенной минерализации (до $3,9 \text{ г/дм}^3$) с специфическими компонентами: сероводородные (родники 1–4, 7) и железистые (родник 5). Данные воды представляют бальнеологическую ценность. Превышения ПДК для питьевых вод по H_2S , H_2SiO_3 и Fe^{2+} указывают на их лечебный, а не столовый характер.

Таблица 1. Расположение исследуемых родников

№	Расположение	Высота, м
1	Правый берег р. Белой, 15 м от уреза воды, на территории санатория «Лесная сказка»	350
2	Правый берег р. Белой, на 0,2 км выше по течению от железнодорожного моста	355
3	Балка Малый Хаджох, в 50 м от впадения его в р. Белую	355
4	Левый берег р. Белой, в 20 м от русла, на 0,46 км выше впадения р. Полковницкой	351
5	Правый берег р. Белой, на 50 м выше водоприемника из р. Белой для санатория "Лесная сказка"	360
6	П. Каменноостровский, на ул. Речной, 32, на правом берегу р. Белой, на 50 м ниже по течению от подвесного моста	405
7	200 м выше по течению от устья б. Войкова	357
8	150 м от турбазы "Горная деревня", между дорогой и правым берегом р. Белой	355
9	1 км от восточной окраины ст. Даховской, вверх по тропе от каменного моста через р. Дах	695
10	Южная часть ст. Даховской, на ул. Набережной, 39, западнее трассы	485
11	Южная часть ст. Даховской, ул. Октябрьской, 72	480

Таблица 2. Гидрохимическая характеристика исследованных родников

№	Водоносный комплекс	Формула химического состава	Минерализация, г/дм ³	Специфические компоненты
1	K ₁	$\frac{HCO_3}{(Na+K)} \frac{63}{57} \frac{SO_4}{Ca} \frac{31}{32} \frac{Cl}{Mg} \frac{6}{10} \frac{Sr}{1}$	0.5–1.5	H ₂ S (<0,6 г/дм ³)
2, 7	K ₁	$\frac{HCO_3}{(Na+K)} \frac{52}{83} \frac{Cl}{Ca} \frac{44}{13} \frac{SO_4}{Mg} \frac{4}{4}$	1.7–3.9	H ₂ S
3	K ₁	$\frac{HCO_3}{(Na+K)} \frac{65}{82} \frac{SO_4}{Ca} \frac{21}{13} \frac{Cl}{Mg} \frac{14}{4} \frac{NH_4}{1}$	1.2	H ₂ S
4	K ₁	$\frac{HCO_3}{(Na+K)} \frac{71}{94} \frac{Cl}{Ca} \frac{20}{4} \frac{SO_4}{Mg} \frac{8}{2} \frac{F}{1}$	1	H ₂ S, повышенная H ₂ SiO ₃
5	K ₁	$\frac{SO_4}{Ca} \frac{54}{83} \frac{HCO_3}{Mg} \frac{46}{8} \frac{Na+K}{4} \frac{Fe}{5}$	0.5	Fe (9,3 мг/дм ³)
6	J ₂₃	$\frac{SO_4}{(Na+K)} \frac{73}{90} \frac{HCO_3}{Ca} \frac{15}{5} \frac{Cl}{Mg} \frac{12}{5}$	2.35	-
8	J ₁₂	$\frac{HCO_3}{Ca} \frac{67}{45} \frac{SO_4}{(Na+K)} \frac{18}{34} \frac{Cl}{Mg} \frac{13}{23} \frac{Fe}{1}$	0.4	Fe
9	J ₁₂	$\frac{HCO_3}{Ca} \frac{85}{78} \frac{SO_4}{Mg} \frac{9}{20} \frac{Cl}{(Na+K)} \frac{4}{2} \frac{NO_2}{2}$	0.4	-
11	J ₁₂	$\frac{SO_4}{Ca} \frac{58}{41} \frac{HCO_3}{(Na+K)} \frac{27}{33} \frac{Cl}{Mg} \frac{15}{26}$	1.1–2.5	-

Сравнительный анализ данных за 1983 и 2008 гг. (родник 1), 2008 и 2009 гг. (родники 4, 8, 11) выявил некоторые изменения:

Родник 1. За 25 лет отмечено снижение концентраций Na⁺ (≈100 мг/л), K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, F⁻, H₂S (≈14 мг/л) при росте Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻. Это может быть связано с изменением путей фильтрации и смещением зоны питания, возможно, под влиянием природных факторов или хозяйственной деятельности на водосборном бассейне.

Родник 4. Зафиксирован резкий рост H₂S (на 4,8 мг/л) и Fe²⁺ (с превышением ПДК), что требует особого внимания ввиду бальнеологического использования источника.

Родник 11. Отмечается кардинальное изменение состава: рост минерализации, увеличение концентраций Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- более чем в 2 раза, появление следов H_2S . Такие резкие сдвиги за год могут быть связаны с локальными антропогенными воздействиями (например, нарушениями вблизи водозабора, загрязнением).

Наблюдаемая динамика свидетельствует о высокой чувствительности систем к внешним воздействиям, что требует организации постоянного мониторинга.

Родники и территория к ним прилегающая испытывает зачастую мощное антропогенное воздействие. Оценка по стадиям рекреационной дигрессии выявила прямую зависимость состояния урочища от его локализации и антропогенной нагрузки:

V стадия (критическая нарушенность): Родники 1, 3, 5 (территория санатория «Лесная сказка»), 6, 10, 11. Характеризуются сильным вытаптыванием, заменой естественной растительности рудеральной или луговой, наличием построек, дорог. Несмотря на высокий рекреационный потенциал (родники 1, 3, 5), экологическое состояние урочищ неудовлетворительное.

II-III стадии (умеренная нарушенность): Родники 2, 4, 8, 9. Отмечаются тропы, изреживание древостоя, но в целом природный каркас сохранен. Эти урочища обладают значительным рекреационным потенциалом при условии минимального благоустройства.

I стадия (условно фоновая): Отдельные участки в удалении от выходов родников.

Наибольшее негативное влияние оказывает прямое хозяйственное освоение (застройка, дороги) и рекреационная нагрузка.

Родники Республики Адыгея в исследованных районах формируются в пределах нижнемелового и юрских водоносных комплексов и отличаются значительным гидрохимическим разнообразием: от пресных гидрокарбонатных до слабосолоноватых сероводородных хлоридно-гидрокарбонатных вод.

Подавляющее большинство источников обладает тем или иным рекреационно-бальнеологическим потенциалом (лечебно-столовым, бальнеологическим). Ключевыми лимитирующими факторами являются повышенное содержание сероводорода, кремниевой кислоты и железа, что определяет не питьевое, а лечебное назначение вод.

Экологическое состояние родников и прилегающих территорий варьирует от условно-фоновое до критически нарушенного (V стадия рекреационной дигрессии). Наиболее деградированы урочища в пределах населенных пунктов и рекреационных объектов, где наблюдаются полное замещение естественной растительности и сильная трансформация почвенного покрова.

Анализ динамики химического состава вод выявил существенные колебания концентраций основных ионов и специфических компонентов (Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , H_2S). Характер изменений в ряде случаев (родник 11) указывает на возможное антропогенное влияние.

Проведенная оценка рекреационной дигрессии ландшафтов говорит о зависимости экологического состояния родника от его местоположения, от степени антропогенной нагрузки вблизи родника. Уровень антропогенной нагрузки (выпас скота, распашка земель, вырубка лесов, строительство дорог и др.) и показатели рекреационной ценности (близость к населенным пунктам, вкусовые и бальнеологические качества воды и др.), являются ведущими факторами, влияющими на особенности геоэкологического состояния родников и родниковых урочищ.

Химическое загрязнение родниковой воды присутствует в родниках, находящихся на территории населенных пунктов. Эти родники, а именно родники 6, 10, 11, относятся к пятой стадии рекреационной дигрессии и не представляют собой ценность для потребления населением. Таким образом, загрязненность территории и высокая степень ее преобразованности влияют на состав воды в роднике.

Большое рекреационное значение имеют родники, содержание химических элементов в которых благоприятствует для использования родниковой воды в качестве питьевого и бальнеолечения. Например, родники 1, 4, 5. Такие родники благоустраиваются, на их территории строятся санатории и рекреационные комплексы.

Список литературы:

Гидрогеология СССР. Т.9. Северный Кавказ. М.: Недра, 1968. 488 с.

Назаренко О.В. Горные ландшафты Адыгеи в условиях антропогенной трансформации // Успехи современного естествознания. 2023. № 12. С. 135-139. doi 10.17513/use.38183.

Назаренко О.В., Михайленко А.В., Смагина Т.А., Кутилин В.С. Природные условия Горной Адыгеи. Ростов-на-Дону - Таганрог: Южный федеральный университет, 2020. 132 с. EDN SJLIU.

Гальцова Т.М. Проект работ на проведение гидрогеологического обследования родников в предгорной и горной части Республики Адыгея. Краснодар, 1999.

Еремина В.Л. Отчет по объекту «Оценка ресурсного потенциала и качества минеральных подземных вод на территории Республики Адыгея». Отчет Краснодарской ПГПП о результатах работ, проведенных в 2008-2009 гг. 147 с.

Зайцева Н.Г. Информационный отчет по итогам работы за 2001 год по мониторингу геологической среды по Северо-Кавказскому региону (Составление классификаторов названий месторождений и участков месторождений подземных вод Северо-Кавказского региона). 2001.

УДК: 556.531

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ И СОВРЕМЕННОЕ КАЧЕСТВО ВОДЫ ВОРОНЕЖСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (2015–2024 гг.)

Первышева О.А., Лавренко Н.Ю.

ФГБУ «Гидрохимический институт», г. Ростов-на-Дону, Россия, natuciy87@gmail.com

Аннотация. Дана комплексная оценка качества воды Воронежского водохранилища в многолетнем плане по основным гидрохимическим показателям, полученным государственной наблюдательной сетью Росгидромета РФ. Выявлены тенденции изменения загрязненности воды водохранилища.

Ключевые слова: Воронежское водохранилище, класс качества воды, метод комплексной оценки качества воды, многолетняя тенденция, характерные загрязняющие вещества, превышение ПДК.

Воронежское водохранилище, созданное в 1971-1972 гг. в нижнем течении р. Воронеж, является одним из крупнейших, целиком расположенным в городской черте. Строительство водохранилища должно было решить вопрос дефицита питьевой и технической воды, рыбохозяйственного комплекса, судоходства, а также создания рекреационной зоны (Разиньков, Титов, 2014). Город Воронеж располагается на обоих берегах водохранилища и обладает развитой транспортной и промышленной инфраструктурой. Воронежское водохранилище представляет собой мелководный водоем руслового типа, вытянутый в меридиональном направлении. Площадь водохранилища 59.9 км², общая протяженность – 35 км, ширина – 2 км, глубина – 2.6 м. Основными источниками наполнения водоема являются атмосферные осадки, приток из р. Воронеж, поверхностные стоки. Водохранилище осуществляет сезонное регулирование стока в устье р. Воронеж в интересах промышленного водоснабжения предприятий города (Вода России..., 2001). За более чем полвека эксплуатации экосистема водохранилища претерпела значительные негативные изменения. Увеличивается заиление водохранилища, которое обусловлено взвешенными и влекомыми наносами, поступающими по руслу р. Воронеж, поступлением материала обрушения и переформирования берегов, эрозией берега, вызывающей смыв грунта на склонах и накоплением песчаного материала из поверхностных стоков и ливневой канализации, что приводит к обмелению водоема и появлению наносов и отмелей (Лубяной, Щербин, 2020). За время существования водохранилища средняя глубина уменьшилась от 2.9 м до 2.6 м (к 2025 г.). В результате распространения мелководных зон повышается прогреваемость воды, которая начинает застаиваться, в ней развиваются цианобактерии и начинается «цветение» водоема (Елисеев, Силкин, 2025). В водохранилище со сточными водами поступает значительное количество загрязняющих веществ, в т. ч. органических и биогенных, способствующих эвтрофированию водоема, которое вызывает изменение структуры гидробиоценоза и ухудшение качества воды, приводит к дополнительному образованию органических веществ в экосистеме, что вызывает нарушение кислородного режима водоема и создает условия для развития патогенной микрофлоры.

Основными источниками промышленного загрязнения Воронежского водохранилища являются ООО «Левобережные очистные сооружения» ООО РВК-Воронеж»), АО «Воронежсинтезкаучук», филиал ПАО «Квадра» Воронежская генерация (ТЭЦ-1), сброс сточных вод, которыми в 2024 г. составил 30454 тыс.м³, 6382 тыс.м³, 577 тыс.м³ соответственно, а также недостаточно развитые системы ливневых канализаций и поступление теплых вод от ТЭЦ (Ежегодники..., 2015–2024).

Материалы

Оценка качества воды Воронежского водохранилища проведена по материалам многолетней (2015–2024 гг.) режимной гидрохимической информации государственной

наблюдательной сети Росгидромета с использованием метода комплексной оценки, которая позволяет оценить загрязненность воды одновременно по широкому перечню показателей качества воды и классифицировать воду по степени загрязненности (РД 52.24.643-2002..., 2003).

Результаты и обсуждение

В Воронежском водохранилище наблюдения за качеством поверхностных вод проводятся гидрохимической сетью Росгидромета в 3-х створах г. Воронеж: 5.5 км выше г. Воронеж (фоновый створ), 2.5 км ниже г. Воронеж (1.2 км ниже п. Песчанка – 1-й контрольный створ) и 7.0 км ниже г. Воронеж (у плотины гидроузла – 2-й контрольный створ).

Характерными загрязняющими веществами (повторяемость случаев превышения ПДК составляла либо превышала 50%) Воронежского водохранилища в течение 2015–2024 гг. являлись легкоокисляемые органические вещества (по БПК₅) (кроме фоновых створа в 2015, 2018, 2021–2022 гг. и 2024 г.) и органические вещества (по ХПК), соединения меди, к которым добавлялись: нефтепродукты в обоих контрольных створах, нитритный азот, в течение большинства лет – фосфор фосфатов, АСПАВ (анионные синтетические поверхностно-активные вещества), в отдельные годы – аммонийный азот (2.5 км ниже г. Воронеж), нитритный азот в 2019 и 2023–2024 гг. (7 км ниже г. Воронеж).

Содержание в воде органических веществ является одним из наиболее важных показателей качества воды. Их образование, трансформация, распад и минерализация влияют на изменение концентраций минеральных форм азота и фосфора. Среднегодовые концентрации легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅) в многолетнем плане мало изменялись, были наименьшими в фоновом створе и колебались в узком диапазоне 1.87–2.26 мг/л, в контрольных створах – 3.48–4.63 мг/л и 2.98–3.62 мг/л.

Наблюдался небольшой рост среднегодового содержания в воде органических веществ (по ХПК) в 2022 г. до 23.3–39.1 мг/л, в створе 2.5 км ниже г. Воронеж в 2021 г. до 46.8 мг/л (рис. 1 а, в, д).

Загрязненность воды соединениями меди характерна для всех створов Воронежского водохранилища, возрастала в 2018 г. в фоновом створе до 2 ПДК, в 1-м контрольном створе до 6 ПДК. В течение последних 2-х лет наблюдается тенденция увеличения содержания в воде соединений меди в обоих контрольных створах города (рис. 1 г, е).

В фоновом створе концентрации основных загрязняющих веществ (кроме соединений меди) в течение 2015–2024 гг. не превышали, либо незначительно превышали нормативы (рис 1 а, б).

Содержание нитритного азота в отдельных пробах воды приближалось к уровню высокого загрязнения в 2020 г., 2022–2023 гг. в воде водохранилища в створе 2.5 км ниже г. Воронеж в зоне влияния промышленных и жилищно-коммунальных предприятий, достигая 9 ПДК. Среднегодовые концентрации в многолетнем плане колебались в основном в пределах 2-4 ПДК, возрастая до 5 ПДК в 2022–2023 гг. (рис. 1 г). В течение последних 3-х лет повторяемость случаев превышения норматива нитритным азотом в этом створе возросла до 100%. Снижение содержания фосфора фосфатов до значений ниже нормативных фиксировали в 2021 г., в остальные годы концентрации составляли в основном 2 ПДК в среднем. Наблюдалась тенденция незначительного роста содержания АСПАВ с 2020 г., за исключением 2023 г. Загрязненность воды водохранилища аммонийным азотом возрастала в среднем в 2020 г. и 2023 г. до 3–3.5 ПДК и снижалась в 2021–2022 гг. до 0.8 ПДК, максимальные концентрации достигали 6 ПДК. Среднегодовое содержание нефтепродуктов в 2023–2024 гг. стабилизировалось на уровне 3 ПДК, максимальные концентрации в отдельные годы (2020, 2023 и 2015 гг.) достигали 5 и 6 ПДК. Критическим показателем устойчивости загрязненности воды в створе 2.5 км ниже г. Воронеж

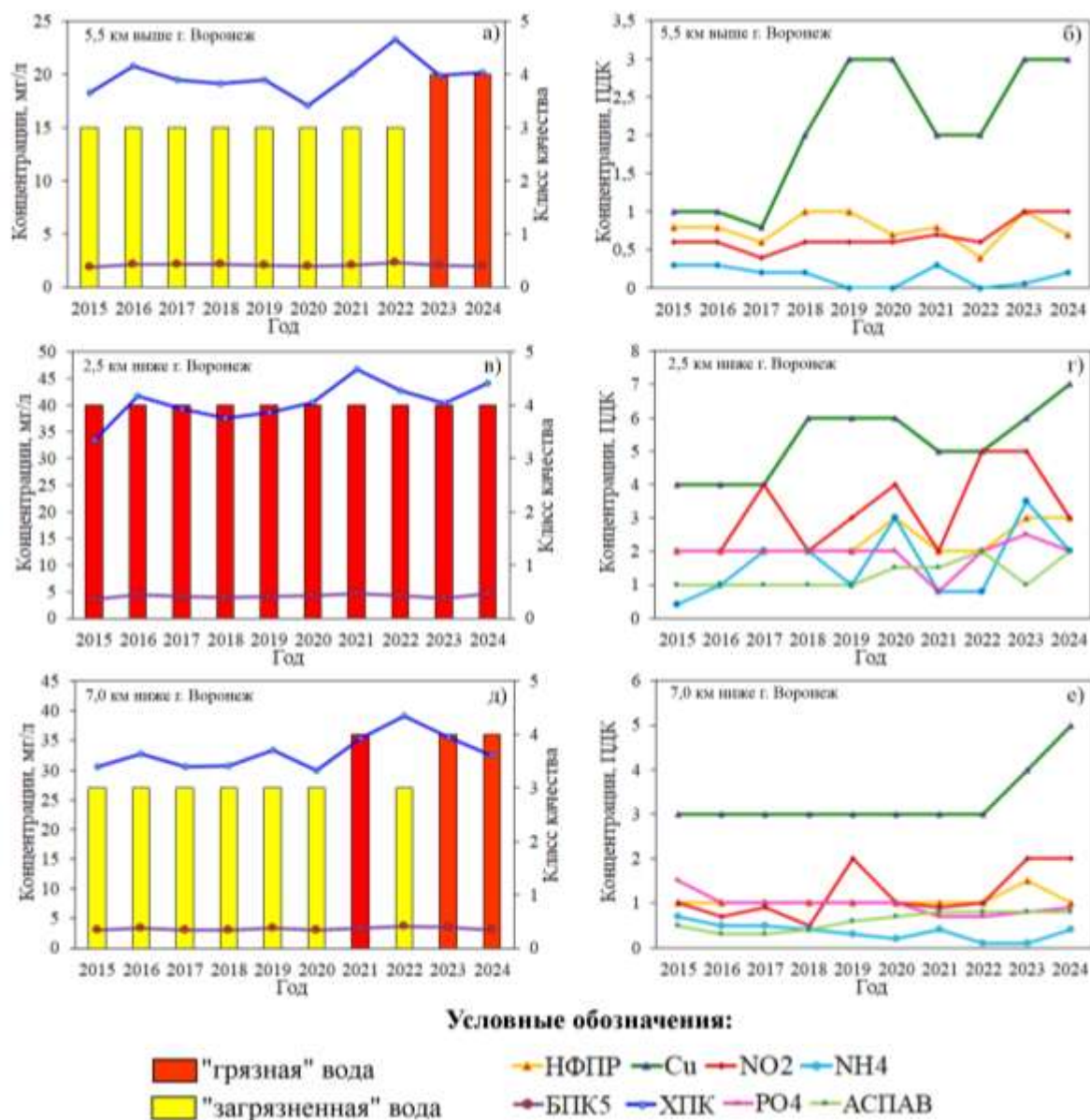


Рис. 1. Изменение среднегодовых концентраций характерных загрязняющих веществ и качества воды Воронежского водохранилища за многолетний период

являлся нитритный азот в большинстве лет рассматриваемого периода, аммонийный азот – в 2023 г.

Менее загрязнена вода водохранилища в многолетнем плане в створе 7 км ниже г. Воронеж (2-й контрольный створ, расположенный непосредственно ниже зоны загрязненности). Среднегодовые концентрации основных загрязняющих веществ изменялись в основном от значений ниже ПДК до 1-2 ПДК, за исключением соединений меди – от 3 до 5 ПДК (рис. 1 д, е). В 2023–2024 гг. отмечался рост повторяемости случаев превышения норматива нитритным азотом до 75-88% и концентраций до 2 ПДК в среднем.

Нарушение режима растворенного в воде кислорода отмечалось в течение 2015–2018 и 2023–2024 гг. в фоновом створе, в 2015 и 2023–2024 гг. в контрольных створах, когда минимальные его концентрации снижались соответственно до 3.15–4.65 мг/л и 4.18–3.96 мг/л в фоновом створе; до 3.47 мг/л и 4.37–4.23 мг/л – в 1-ом контрольном, до 3.15 мг/л и 4.86–4.12 мг/л – во 2-м контрольном створе.

Комплексная оценка качества воды Воронежского водохранилища по гидрохимическим показателям свидетельствует о том, что, исходя из анализа многолетних данных, наименее

загрязненной являлась вода в фоновом створе (5.5 км выше г. Воронеж) и 2-ом контрольном створе (7 км ниже г. Воронеж, за исключением 2021 г.) в 2015–2022 гг. и характеризовалась как «загрязненная», либо «очень загрязненная», оцениваясь 3-м классом качества и ухудшаясь в 2023–2024 гг. до уровня 4 класса («грязная» вода). В течение 2015–2024 гг. вода водохранилища в 1-м контрольном створе (2.5 км ниже г. Воронеж), где прослеживается негативное влияние сточных вод промышленных предприятий и очистных сооружений города, мало изменялась и оценивалась как стабильно «грязная» (4 класс качества) (рис. 1 а, в, д).

Выводы

Анализ динамики содержания основных загрязняющих веществ в воде Воронежского водохранилища показал тенденцию роста содержания в воде соединений меди в контрольных створах в 2023–2024 гг. и снижения аммонийного и нитритного азота в створе 2.5 км ниже г. Воронеж. В 2023 г. и 2024 г. отмечалось ухудшение кислородного режима во всех створах города.

Несмотря на ежегодно проводимые водоохранные мероприятия (дно углубительные работы, проведение работ по доведению качества сбрасываемых сточных вод до нормативов допустимых сбросов и др.) существенного изменения качества воды Воронежского водохранилища в 1-ом контрольном створе (2.5 км ниже г. Воронеж) не наблюдается, в многолетнем плане вода характеризуется как стабильно «грязная». В течение 2015–2022 гг. в фоновом (5.5 км выше г. Воронеж) и 2-м контрольном створах (7 км ниже г. Воронеж) преобладала вода 3-го класса качества («загрязненная»), ухудшаясь в 2023–2024 гг. до – 4-го класса («грязная»).

Список литературы:

Вода России. Водохранилища/ Под научн. ред. А.М.Черняева; ФГУП РосНИИВХ. – Екатеринбург: Издательство "АКВА-ПРЕСС", 2001.– 700 с.

Елисеев А.А., Силкин К.Ю. Экологическое состояние Воронежского водохранилища (обзор научных публикаций) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 118–130.

Ежегодники «Качества поверхностных вод и эффективности проведенных водоохранных мероприятий по территории деятельности ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС» за 2015-2024 гг.

Лубяной Д.С., Щербин Е.А. Анализ экологических проблем Воронежского водохранилища // «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки». 2020. № 12(51). С. 21–27.

Разиньков Н.Д., Титов С.Л. Экологические проблемы Воронежского водохранилища и возможность расширения спектра методов их преодоления // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2014. № 1(5). С. 15–18.

РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2003. – 49 с.

УДК 556.114(282.247.344)"2019/2024"

**ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДЫ В РЕКЕ ЧЕРНАЯ С 2019 ПО 2024 ГГ.
(СЕВАСТОПОЛЬ, ЮГО-ЗАПАДНЫЙ КРЫМ)**

Петрова Ю.А., Гаврилова Ю.А.

ФИЦ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия,
juliacosac@gmail.ru

Аннотация. В работе проведен анализ гидрохимических показателей вод р. Черная по данным государственного мониторинга для пунктов наблюдений в верхнем, среднем и нижнем течении реки с 2019 по 2024 гг. Выявлены наибольшие концентрации биогенных веществ и некоторых тяжелых металлов, превышающие нормативы до 4 раз, в нижнем течении реки. Зафиксировано снижение качества воды в верхнем и среднем течении реки до класса 3А.

Ключевые слова: мониторинг, гидрохимические показатели, тяжелые металлы, река Черная, город Севастополь.

Оценка пространственного распределения гидрохимических показателей пресных вод в условиях роста антропогенной нагрузки относится к ключевым параметрам экологического мониторинга. За последнее десятилетие социальное и экономическое развитие Севастопольского региона стремительно выросло⁵², вследствие чего увеличилась антропогенная нагрузка на водные экосистемы региона. Учитывая, что р. Черная является единственным поверхностным водотоком питьевого назначения города Севастополя была поставлена цель работы выявить особенности пространственного распределения гидрохимических показателей на пунктах государственного мониторинга вдоль русла р. Черная и выполнить оценку качества водного объекта.

Река Черная входит в перечень основных рек Крыма и находится в условиях климатической засушливости Крымского полуострова (Каюкова, Юровский, 2016; Олиферов, Тимченко, 2005). Протяженность русла составляет 35 км, площадь водосборного бассейна реки – 669 км² (Кондратьев, 2025), среднегодовой объем поступления сточных транзитных и других вод достигает 2 и более млн.м³, а среднегодовой расход воды на р. Черная составляет 0,78-3,68 м³/с (Доклад..., 2025). Река Черная имеет 11 притоков общей площадью водосбора 287,02 км². В состав гидрологической сети реки также входит Чернореченское водохранилище площадью 6,04 км² и объемом 64 млн. м³. (Доклад..., 2025). Основными источниками загрязнения реки являются сточные воды от канализационных очистных сооружений и водоочистной станции ГУПС «Водоканал» и сток с водосборной площади в период паводка.

В соответствии с государственной программой «Экология и охрана окружающей среды города Севастополя» с 2015 г. проводится мониторинг экологического состояния вод р. Черная в верхнем, среднем и нижнем течении. Оценка качества вод р. Черная проводилась ежегодно с 2019 по 2024 гг на 5 пунктах наблюдений (далее – ПН) (Доклад..., 2025). Пробы воды отбирали ежеквартально (по сезонам) в верхней части реки в с. Родниковое (ПН1), в средней части - п. Октябрьский (ПН2), п. Сахарная головка (ПН3) и устьевой части реки в п. Зеленая горка (ПН4), г. Инкерман (ПН5) (рис. 1).

Для анализа гидрохимических показателей и оценки качества вод р. Черная использованы данные государственного мониторинга поверхностных водных объектов в рамках государственной программы «Экология и охрана окружающей среды города Севастополя» по государственному контракту Департамента природных ресурсов и экологии города Севастополя с 2020 по 2024 гг.

⁵² Город Севастополь в цифрах 2024: Крат.стат.сб. / Крымстат – Севастополь, 2025 – 158 с.

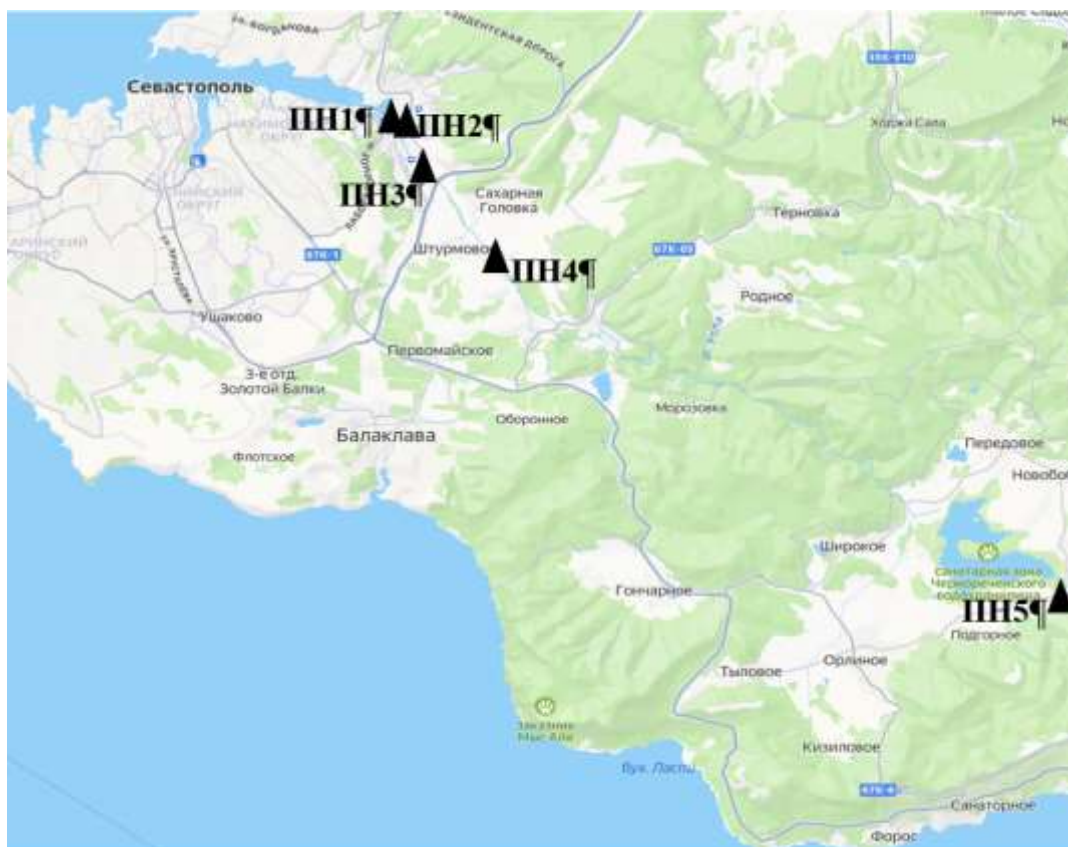


Рис. 1. Карта-схема участков экологического мониторинга р. Черная.
Черный треугольник – пункт наблюдения воды; ПН – номер пункта наблюдения

Химико-аналитический анализ материала выполнен аккредитованными лабораториями ООО «РусИнтеКо», ООО «Экосвет», ООО «Биопотенциал» по следующим показателям: pH, растворенный O₂, Cl, SO₄, БПК₅, ХПК, NH₄, NO₂, NO₃, Fe, Cu, Zn, Ni, Mn, Mg, Ca, Si, Cr (VI), PO₄, нефтепродукты, фенолы, взвешенные вещества, сумма ионов (сухой остаток), АПАВ, хлорорганические пестициды (α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, ДДТ, ДДД, ДДЭ, ГХБ). Для сравнительной оценки пространственного распределения гидрохимических показателей и качества вод на разных участках проводили анализ полученных результатов с нормативами качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения⁵³. Расчет удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) выполнен в соответствии с Методом комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям⁵⁴.

По результатам исследований участков мониторинга показано, что наибольшие концентрации загрязняющих веществ наблюдаются в устьевой части р. Черная. Так, в ПН Инкерман определены наибольшие ежегодные концентрации фенолов (0.006–0.0024 мг/дм³), нефтепродуктов (0.074–0.0222 мг/дм³), марганца (0.0096–0.062 мг/дм³), магния (8.2–195.5 мг/дм³), сульфатов (331.3–1174 мг/дм³), хлоридов (2797–10467 мг/дм³). А на участке наблюдений НП Зеленая горка помимо высоких концентраций в воде железа общего, марганца, магния, сульфатов и хлоридов наблюдались среднегодовые максимальные значения БПК₅ (2.6–5.3 мгО₂/дм³), ХПК (5.9–91.6), кремния в 2024 г. (2.8–4.775 мг/дм³).

⁵³ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»

⁵⁴ РД52.24.643–2002 Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям // Методические указания. – СПб: Гидрометиздат. – 50 с.

Наибольшие значения рН среды (7.4–8.35) за период наблюдений отмечены на участке мониторинга Створ 2 в ПН Сахарная головка. Также, на этом участке были выявлены высокие концентрации среднегодовых значений меди (0.00077–0.00364 мг/дм³), нитритов в отметке 0.006 мг/дм³ в 2021 г. и взвешенных веществ в 2024 г., концентрация которых достигла 46.125 мг/дм³.

Низкие концентрации загрязнителей по результатам анализа мониторинга были выявлены на участке наблюдений в ПН Родниковое. Так, содержание ХПК варьировало в пределах 4.5–78.5, содержание железа от 0.062 до 0.149, а концентрация нефтепродуктов не превышала 0.02 мг/дм³.

Согласно величине удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) в устьевой зоне р. Черная (табл. 1) водные массы являются наиболее грязными (класс 4А, 4Г, грязная) по сравнению с верхним и средним течением (класс 1, 3А, 3Б, загрязненная).

Таблица 1. Характеристика качества вод реки Черная региона Севастополя по удельному комбинаторному индексу загрязненности воды на участках мониторинга в 2019–2024 гг.

Год	Пункт наблюдения/Класс качества вод									
	ПН 1		ПН 2		ПН 3		ПН 4		ПН 5	
	ККВ*	СЗВ**	ККВ	СЗ воды	ККВ	СЗ воды	ККВ	СЗ воды	ККВ	СЗ воды
2019	4Г	очень грязная	–		2	слабо загрязненная	2	слабо загрязненная	2	слабо загрязненная
2020	4А	грязная	–		2	слабо загрязненная	2	слабо загрязненная	2	слабо загрязненная
2021	4А	грязная	4А	грязная	1	условно чистая	1	условно чистая	2	слабо загрязненная
2022	4А	грязная	3Б	очень загрязненная	3А	загрязненная	3А	загрязненная	2	слабо загрязненная
2023	4А	грязная	4А	грязная	3Б	очень загрязненная	3Б	очень загрязненная	3А	загрязненная
2024	4А	грязная	4А	грязная	3А	загрязненная	3А	загрязненная	3А	загрязненная

* класс качества вод;

** степень загрязнения воды.

Показано, что в НП Инкерман наблюдаются амплитудные колебания качества воды, при которых максимальное значение УКИЗВ отмечено в 2019 г. и минимальное в 2021 г. (5.2 и 2.81) соответственно. Увеличение значения этого показателя наблюдалось с 2022 по 2024 гг. до отметки 4.6.

Сходные межгодовые изменения УКИЗВ зафиксированы в ПН Зеленая горка в устьевой части реки, где значения индекса варьировали от 2.59 до 4.5 в 2022 и 2024 гг. соответственно. Для среднего течения реки наименьший показатель УКИЗВ был отмечен в 2021 г. в ПН Сахарная головка (0.75) и ПН Октябрьский (0.84), а максимальный – в 2023 г. За исследуемый период наблюдений для верхнего течения р. Черная (ПН Родниковое) выявлена стабильная динамика увеличения УКИЗВ от 1.24 до 2.6.

Выполненный анализ содержания загрязняющих веществ в водах р. Черная показал значительное увеличение влияния промышленных и социальных объектов, расположенных в среднем и нижнем течении реки, что повлияло на качество водных масс. Наиболее выраженное негативное влияние обнаружено в нижней части реки в ПН Инкерман и ПН Зеленая горка. Учитывая, что пресноводные ресурсы для города Севастополя имеют важное экологическое и

социально стратегическое значение, рекомендовано выработать научно обоснованные рекомендации по улучшению качества среды на основе данных многолетнего мониторинга.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИНБЮМ по теме «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ гос. регистрации 124022400148-4).

Список литературы:

Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г. Водные ресурсы Крыма //Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2016. №. 1. С. 25-32.

Ежегодный доклад о состоянии и об охране окружающей среды города Севастополя за 2024 год. - Севастополь: Департамент природных ресурсов и экологии города Севастополя (Севприроднадзор), В 2 ч. Ч. 1. 2024. 202 с.

Кондратьев С. И. Гидрохимическая структура реки Черной (Крым) в 2012–2023 годах // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 4. С. 27–38. EDN OVGMMMS.

Олиферов А.Н., Тимченко З.В. Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 214 с.

УДК 504.45(470.324)

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ ИСТОЧНИКОВ
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ**

Прожорина Т.И., Баранова А.А., Потапова Э.Г.

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, coriandre@rambler.ru

Аннотация. В Воронежской области 38.7% преимущественно сельского населения используют в питьевых целях воду децентрализованных источников без предварительной очистки.

В работе представлены данные полевых исследований в период с 2024 по 2025 годы, в ходе которых было отобрано 302 пробы воды в 34 районах области, в том числе: 113 скважин, 105 родников, 53 колодца и 31 колонка. Комплексная оценка качества отобранных проб воды проводилась по результатам органолептического, химического и микробиологического анализов. Органолептические показатели не соответствуют нормативам по интенсивности вкуса (12.5%) и запаха (11.54%), цветности (9.62%), наличию недопустимого в воде осадка (8.65%). Результаты химического анализа показали значительные превышения гигиенических нормативов по нитратам (30.29% проб), жесткости (28.37%), аммонийному азоту (12.5%), железу (5.8%). Удельный вес проб, не соответствующих нормативам по микробиологическим показателям, составляет для ОМЧ – 18%, ОКБ – 27%, ТКБ – 9%.

Ключевые слова: децентрализованные источники, качество питьевой воды, гигиенические нормативы, органолептический, химический и микробиологический анализ.

По данным Роспотребнадзора РФ около 10% населения страны не обеспечено качественной питьевой водой из систем *централизованного* водоснабжения. Особенно тревожная ситуация с обеспеченностью безопасной питьевой водой сложилась в сельской местности, где часто преобладают источники *децентрализованного* хозяйственно-питьевого водопользования (ДХПВ), что характерно и для агропромышленной Воронежской области. Из-за отсутствия централизованного водопровода, около 892.4 тыс. человек на территории региона вынуждены использовать для питьевых целей воду децентрализованных источников (*индивидуальные скважины, колодцы, колонки, родники*), т.е. воду, не прошедшую очистку, и в большинстве случаев характеризующуюся низким качеством (Боева, 2023).

При этом Управлением Роспотребнадзора по Воронежской области на постоянной основе ведется мониторинг за состоянием объектов только централизованного водоснабжения (*источники и распределительная водопроводная сеть*), а наблюдения за децентрализованными (местными) источниками не предусмотрены. По законодательству РФ контроль за качеством таких вод возложен на органы исполнительной власти региона совместно с органами местного самоуправления.

В качестве мониторинговых точек контроля, равномерно распределенных по территории области и учитывающих плотность населения, были выбраны 34 территории (3 городских округа и 31 муниципальный район). В период с 2024 по 2025 годы было отобрано 302 пробы воды, в том числе: 113 скважин, 105 родников, 53 колодца и 31 колонка.

Комплексная оценка качества отобранных проб воды из источников децентрализованного водопользования селитебных территорий Воронежской области проводилась по результатам органолептического, химического и микробиологического анализов.

Первым этапом оценки качества питьевой воды является проведение органолептического анализа, основанного на органах чувств исследователя, поэтому этот метод является субъективным, но позволяет дать предварительную оценку качества источника водопользования (Прожорина, 2025).

Полученные результаты, приведенные в таблице 1, сравнивали с ПДК для децентрализованных источников, соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Таблица 1. Результаты органолептического анализа воды в децентрализованных источниках по Воронежской области

Наименование показателя и единица измерения	Показатель			ПДК для источников ДХПВ	Уд. вес проб, не соответствующих нормативу, %	Макс. превышение норматива (число раз)
	Минимум	Максимум	Среднее			
Осадок	Отс.	большой хлопьевидный черный	Отс.	-	8.65	-
Прозрачность, см	2,4	18	15-18	-	3.37	-
Цветность, град.	5	> 80	20-30	35	9.62	2.3
Запах, балл	0	V	II-III	II	11.54	2.5
Вкус, балл	0	V	II-III	II	12.5	2.5

Повышенные значения органолептических показателей косвенно свидетельствуют о загрязнении исследованных источников ДХПВ, так как установлено, что качество питьевой воды не соответствует нормативам по интенсивности вкуса (12.5%) и запаха (11.54%), цветности (9.62%), наличию недопустимого в воде осадка (8.65%).

Второй этап предполагает определение санитарно-химических показателей. Химический анализ отобранных проб проводился по 14 показателям, из которых 6 являются приоритетными для региона (*общая жесткость, минерализация, концентрации железа, марганца, бора, нитратов*). Для достоверности результатов анализа каждая проба выполнялась в 2-х кратной повторности.

Данные химического анализа (табл. 2) по приоритетным показателям позволили выявить, что наибольший процент удельного веса проб, не соответствующих санитарно-гигиеническим нормам, отмечается по *нитратам* (30.29%), *солям жесткости* (28.37%), *аммонийному азоту* (12.5 %) и *железу* (5.8%). Максимальные превышения ПДК для питьевых вод *децентрализованного* водопользования зафиксированы по содержанию нитратов (11.23 раза), железа (5.51 раза), аммонийному азоту (5.27 раза), общей жесткости (3.05 раза) и минерализации (1.29 раза).

Результаты химического анализа исследуемых проб воды позволили обнаружить значительные превышения санитарно-гигиенических нормативов, что вызывает сомнения в безопасности употребления воды такого химического состава (Красникова, 2025).

Третьим этапом, характеризующим эпидемиологическую безопасность питьевой воды, является микробиологический анализ. В любой природной воде обитают микроорганизмы, большая часть которых поступает из почвы. Воды глубоких артезианских скважин и родников являются наиболее чистыми, и, наоборот, воды открытых водоемов имеют высокие уровни микробного загрязнения.

В данных исследованиях индикаторами качества воды были выбраны 3 микробиологических показателя: общее микробное число (ОМЧ), общие колиформные бактерии (ОКБ) и термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ), которые входят в перечень региональных приоритетных показателей для оценки эпидемиологической безопасности питьевой воды (Боева, 2022).

Таблица 2. Показатели качества питьевой воды в источниках децентрализованного хозяйственно-питьевого водоснабжения по Воронежской области

Наименование показателя и единицы измерения	Показатель			ПДК хозяйственно-питьевые для децентрализованного водоснабжения	Удельный вес проб, не соответствующих нормативу, %	Максимальное превышение норматива (число раз)
	Минимум	Максимум	Среднее			
pH	5.61	8.35	6.5	6.0 – 9.0	1.44	-
Минерализация, мг/л	77	1930	518	1500	0.48	1.29
Общая жесткость, ммоль/л	2.1	30.5	9.0	10.0	28.37	3.05
Ca ²⁺ , мг/л	15.4	318.8	109	200	2.71	1.59
Mg ²⁺ , мг/л	3.0	146.2	40	100	3.85	1.46
HCO ₃ ⁻ , мг/л	12.9	532.2	216.4	500	0.96	1.06
SO ₄ ²⁻ , мг/л	10.5	510	78.6	500	0.48	1.02
Cl ⁻ , мг/л	6.9	684.4	87.9	350	2.40	1.95
Fe _{общ} , мг/л	0.01	5.51	0.2	1.0	5.80	5.51
Mn _{общ} , мг/л	0.01	0.44	0.04	0.5	0	0
В _{общ} , мг/л	0.05	1.5	0.13	0.5	0.96	2.0
NH ₄ ⁺ , мг/л	0.05	10.53	0.79	2	12.5	5.27
NO ₂ ⁻ , мг/л	0.01	6.51	0.23	3.3	2.40	1.97
NO ₃ ⁻ , мг/л	0.19	505.5	46.7	45	30.29	11.23

В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 допустимая норма ОМЧ в питьевой воде не должна превышать 50 КОЕ/см³, а источников *децентрализованного* водопользования – 100 КОЕ/см³, а присутствие ОКБ и ТКБ в питьевой воде *не допускается*.

Для оценки эпидемиологической безопасности воды нами была использована база данных, предоставленная ФБУЗ «Центром гигиены и эпидемиологии в Воронежской области» за 2025 год, создаваемая периодически на договорной основе. Объектом исследования послужили 22 пробы воды из индивидуальных скважин, отобранные в 6 муниципальных районах области (Кантемировский, Каширский, Рамонский, Новоусманский, Хохольский) и г. Воронеже.

Анализ данных позволил обнаружить превышение норматива санитарно-микробиологических показателей безопасности воды. В 4 пробах ОМЧ превысило норму в 3, 3, 2.9 и 1.13 раза соответственно. В 7 пробах обнаружены ОКБ и ТКБ, причем в 2 пробах наблюдается сплошной рост общих колиформных и термотолерантных бактерий, входящих в группу бактерий кишечных палочек, присутствие которых в питьевой воде недопустимо. Удельный вес проб, не соответствующих нормативам по микробиологическим показателям, составляет для ОМЧ – 18%, ОКБ – 27%, ТКБ – 9%. Это связано с повышенной обсемененностью вод в летний период, наиболее благоприятный для жизнедеятельности микроорганизмов, либо с антропогенным влиянием на экологическое состояние местных источников (родники, скважины, колонки). Присутствие микроорганизмов свидетельствует о санитарном неблагополучии данных объектов, а употребление воды из этих источников может причинить вред здоровью (Куrolап, 2025).

Таким образом, комплексная оценка качества воды в источниках децентрализованного водопользования селитебных территорий Воронежской области подтвердила, что основными загрязняющими веществами питьевой воды в регионе являются общая жесткость, обусловленная природными условиями, и нитраты, связанные с хозяйственной деятельностью.

В сложившихся обстоятельствах контролирующим органам региона рекомендуется усилить мониторинг качества питьевой воды. Жителям, как городов, так и сельской местности, следует использовать бытовые фильтры для дополнительной очистки воды.

Итоги проведенных исследований могут послужить основой для корректировки и оптимизации мероприятий в рамках региональной водной политики, нацеленных на обеспечение населения Воронежской области качественной питьевой водой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00219, <https://rscf.ru/project/25-17-00219/>

Список литературы:

- Боева А.С., Прожорина Т.И., Куролап С.А., Иванова Е.Ю., Баскакова А.Г. Санитарно-химическая и микробиологическая оценка качества воды родников Воронежской области // Известия Дагестанского гос. педагог. ун-та серия Сер.: Естественные и точные науки. 2022. Т.16. №1. С. 53-60.
- Боева А.С. Оценка экологических рисков для здоровья населения Воронежской области, связанных с качеством питьевой воды в источниках децентрализованного водопользования // Вестник Воронежского гос. ун-та, Сер.: География. Геоэкология, 2023. № 3. С.90-97.
- Красникова А.А., Клепиков О.В., Механтьев И.И., Прожорина Т.И., Мамчик Н.П., Занина М.Я. Оценка риска для здоровья от нитратного загрязнения на территории Воронежской области // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 8. С. 70–77.
- Куролап С.А., Клепиков О.В., Прожорина Т.И., Суханов П.А. Анализ результатов апробации унифицированной методики для комплексной оценки качества источников децентрализованного питьевого водопользования крупного агропромышленного региона // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2025. № 3(34). С.104-112.
- Прожорина Т.И., Суханов П.А., Боева А.С. Результаты гидроэкологических исследований состояния питьевого водопользования на территории Воронежской области // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: География. Геоэкология, 2025. №3. С.163-168.

УДК 543.3

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ КОАГУЛЯНТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ВОДОПОДГОТОВКИ

Тулякова Е.С.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, *tuliakova.katya2001@yandex.ru*

Аннотация. В статье представлены результаты сравнения свойств коагулянтов – сернокислого алюминия и хлорного железа (III), выбранных для осветления воды Черной речки Санкт-Петербурга. Были измерены такие показатели качества воды как pH, щелочность, мутность, цветность, жесткость до и после коагуляции.

Ключевые слова: Черная речка, коагуляция, хлорное железо (III), сернокислый алюминий

Современная экология уделяет особое внимание состоянию водных ресурсов, в частности контролирует качество воды, используемой в хозяйственно-бытовых и промышленных целях. Вопросы очистки и водоподготовки актуальны для крупных городов, к которым относится Санкт-Петербург. На протяжении нескольких лет Городской комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности относил к самым загрязненным рекам города Охту, Черную речку, Ижору и Карповку.

Объектом исследования стала вода Черной речки. На качество воды Черной речки оказывают большое влияние хранилища нефтепродуктов Северного завода, стоки продуктовых и промтоварных магазинов, активные градостроительные работы в Приморском районе. Для того чтобы улучшить показатели качества исходной воды (мутность, цветность и пр.), была осуществлена коагуляция с помощью двух реагентов – сернокислого алюминия и хлорного железа (III).

Измерение pH было проведено на pH-метре «HANNA». Щелочность, мг-экв/л, была найдена по формуле 1:

$$\text{Щ} = \frac{(N_{\text{HCl}} \cdot 1000 \cdot V_{\text{HCl}})}{V_{\text{пробы}}}, \quad (1)$$

где N_{HCl} – нормальность раствора HCl (0.1н); V_{HCl} – объем кислоты, пошедший на титрование, мл; $V_{\text{пробы}}$ – 100 мл.

С помощью тест комплекта «Крисмас» была определена мутность воды Черной речки.

В соответствии с ГОСТ 31954-2012 «Вода питьевая. Методы определения жесткости» комплекснометрическим способом титрования была определена жесткость воды. Жесткость, мг-экв/л, найдена по формуле 2:

$$\text{Ж} = \frac{N_{\text{тр Б}} \cdot 1000 \cdot V_{\text{тр Б}}}{V_{\text{пробы}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{тр Б}}$ – нормальность раствора Трилона Б (0.1н); $V_{\text{тр Б}}$ – объем Трилона Б, пошедший на титрование, мл; $V_{\text{пробы}}$ – 100 мл.

Определение цветности проводилось на спектрофотометре «UNICO 2802». По методике, приведенной в руководстве по определению показателей качества воды полевыми методами (Муравьев, 2009), была приготовлена хром-кобальтовая шкала для построения градуировочного графика цветности (рис. 1).

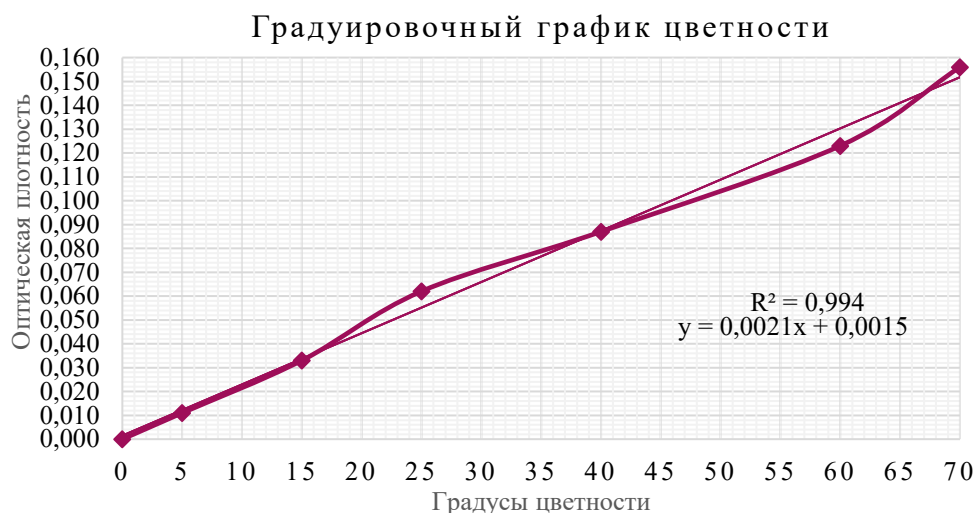


Рис. 1. Градуировочный график цветности

Средние значения показателей качества воды Черной речки до проведения коагуляции приведены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели качества воды до обработки коагулянтами.

Показатели качества воды	Исходная вода до коагуляции сульфатом алюминия	Исходная вода до коагуляции хлоридом железа	СанПиН 1.2.3685-21
рН	7.6	7.7	6-9
Щелочность, мг/л	6.4	4.9	-
Мутность, мг/л	27.6	27.8	1.5
Цветность, град	45.3	36	20
Жесткость, мг/л	6.7	6.8	7.0

Вода до осветления не соответствует нормам СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

В настоящее время единственной используемой на практике формулой, используемой для определения ориентированной дозы коагулянта в технологии очистки природных вод является формула 3, рекомендованная в СП 31.13330.2021 "СНиП 2.04.02-84* водоснабжение. Наружные сети и сооружения".

$$D_k = \sqrt[4]{Ц} \quad (3)$$

где Ц – цветность воды; D_k – доза коагулянта по сульфату алюминия/хлорному железу (III), мг/л.

Доза по оксиду алюминия/оксиду железа (III), мг/л рассчитывается по формуле 4:

$$D = F \cdot D_k \quad (4)$$

где F – фактор пересчета, отношение молекулярных масс оксида алюминия ($F=3$) и хлорного железа ($F=1$).

Дозы подщелачивающих реагентов для улучшения процесса коагуляции стоит определять по формуле 5:

$$D_{\text{щ}} = K_{\text{щ}} \left(\frac{D_{\text{к}}}{e_{\text{к}}} - \text{Щ} \right) + 1 \quad (5)$$

где $D_{\text{щ}}$ - доза подщелачивающего реагента, мг/л; $K_{\text{щ}}$ - коэффициент, равный по извести – 28, для соды – 53; $e_{\text{к}}$ – эквивалентная масса коагулянта, принимаемая для $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – 57, FeCl_3 – 54; Щ-щелочность воды.

Если значение получилось отрицательное, то воду подщелачивать не нужно.

В таблице 2 представлены результаты расчетов ориентированных доз коагулянтов.

Таблица 2. Рассчитанные дозы коагулянтов.

Доза	Сульфат алюминия	Хлорное железо
$D^{\text{к}}$, мг/л	26.9	24
D , мг/л	8.07	24
$D^{\text{щ}}$, мг/л	–261	–235

Значение доз щелочного реагента получились отрицательные, поэтому воду подщелачивать не нужно в обоих случаях. Поскольку для осветления воды вводят растворы коагулянтов, то был проведен перерасчет доз в мл, использован 1.01198% раствор сульфата алюминия и 1.01% раствор хлорида железа (III). При введении ориентированных доз 2.7 мл и 2.4 мл сульфата алюминия и хлорного железа соответственно образование хлопьев не наблюдалось, поэтому объем дозы был увеличен до 5 мл. В таблице 3 приведены результаты коагулирования различными дозами коагулянтов.

Таблица 3. Данные по дозам коагулянтов.

Коагулянт	Объем, мл	Доза, мг	Время начала образования хлопьев, мин	Время начала оседания хлопьев, мин	Время конца оседания хлопьев, мин
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	5	15.3	8	20	90
	10	30.6	3	15	60
	15	45.6	2	5.5	45
	20	61.2	5	12	50
	25	76.5	3-4	13	45
	30	91.8	2	9	44
FeCl_3	5	50.5	1	7	30
	10	101	0,5	4	27
	15	151.5	0,3	2	12
	20	202	0.25	1.5	5
	25	252.5	0,2	1	4

После коагуляции сернокислым алюминием и хлорным железом были определены показатели качества воды и содержание остаточного алюминия/железа (табл. 4). Остаточный алюминий и железо были измерены в лаборатории «Балтводхоз» г. Санкт-Петербург на основании СанПиН 1.2.2685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Таблица 4. Показатели качества воды Черной речки после коагуляции.

Al ₂ (SO ₄) ₃							
№ п/п	Доза, мг	рН	Щелочность, мг/л Щ	Мутность, мг/л	Цветность, Ц град	Жесткость, Ж _{общ} мг/л	Остаточный алюминий, Al _{ост} мг/л
1	15.3	7.15	3,5	0	36	6.7	0.146
2	30.6	6.72	3,00	0	21	6.6	0.094
3	45.6	6.55	2,3	0	7	6.7	0.098
4	61.2	6.62	2,9	0	12	6.75	0.199
5	76.5	6.52	1,9	0	10	6.65	0.281
6	91.8	6.24	1,2	0	5	6.7	0.193
FeCl ₃							
№ п/п	Доза, мг	рН	Щелочность, мг/л	Мутность, мг/л	Цветность, Ц град	Жесткость, Ж _{общ} мг/л	Остаточный алюминий, Al _{ост} мг/л
1	50.5	7.40	5.2	0	26	6.7	0.0179
2	101	7.18	3.6	0	19	6.8	0.0196
3	151.5	6.75	3.6	0	17	6.7	0.0505
4	202	6.58	2.4	0	12	6.7	0.0248
5	252.2	6.17	2.0	0	7	6.8	0.267

На основании табл. 4 можно сделать следующие выводы:

- рН после коагуляции находится в пределах нормы (6–9);
- Мутность после коагуляции отсутствует;
- Цветность превышает 20° цветности в пробах № 1-2 для сульфата алюминия и в пробе № 1 для хлорида железа (III);
- Общая жесткость не превышает 7° цветности после коагуляции;
- Остаточный алюминий после коагуляции сульфатом алюминия превышен в пробе № 5 (ПДК 0.2 мг/л), остаточное железо в норме (ПДК 0.3 мг/л).

Исходя из данных о начале и скорости коагуляции, показателей качества воды были выбраны оптимальные дозы реагентов для проведения коагуляции воды Черной речки – по сульфату алюминия 45.6 мг; по хлориду железа (III) 202 мг. При этих дозах наблюдается наименьшая цветность воды, все показатели качества воды в норме, превышения по остаточному алюминию/железу нет. Поскольку оптимальная доза хлорида железа (III) в 4 раза больше дозы по сульфату алюминия, то наиболее подходящим с экономической точки зрения коагулянт для осветления воды Черной речки будет сульфат алюминия.

В дальнейшем интересно провести сравнение сульфата алюминия на примере воды Черной речки с другими коагулянтами, применяемыми для водоподготовки: алюминатом натрия, оксихлоридом алюминия, оксисульфатом алюминия, железным купоросом, сернокислой окисью железа (Фрог, 2015).

Список литературы:

Муравьев А.Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. СПб.: «Крисмас», 2009. 248 с.

Фрог Б.Н. Первов А.Г. Водоподготовка М: Издательство АСВ, 2015. 512 с.

УДК 628.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОЧИЩЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ГОРОДА ЕКАТЕРИНБУРГ

Фонова С.И., Эпиташвили А.В.

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия, sveta.27@mail.ru,
a.epit@mail.ru

Аннотация. Выполнено исследование химического состава очищенных сточных вод города Екатеринбург. Цель работы - применение гидроэкодиагностики для выявления элементов, требующих корректировки работы станций очистки сточных вод. Объект исследования – очищенные сточные воды. Основные результаты – выявлены химические элементы, определяющие этапы очистки, требующие корректировки.

Ключевые слова: очищенные сточные воды, гидроэкодиагностика

Гидроэкодиагностика очищенных сточных вод позволяет определить не только качество очистки, но и выявляет элементы станций, которым требуется корректировка их работы. Данный метод позволяет оперативно принимать решения для улучшения качества очистки сточных вод и предотвращения негативного влияния на водоемы. Целью настоящей работы является гидроэкодиагностика техногенных вод, прошедших очистку на станциях города Екатеринбург (Фонова и др., 2022–2025). Отбор проб выполнялся в лотке Вентури, осенью 2022 года. Исследовались образцы с семи выпусков очищенных сточных вод по следующим показателям: цинк (рис. 1), медь (рис. 2), фенол (рис. 3) химическое потребление кислорода, биологическое потребление кислорода за 20 дней, железо, нефтепродукты, сульфат-ион, хлорид-ион, алюминий.

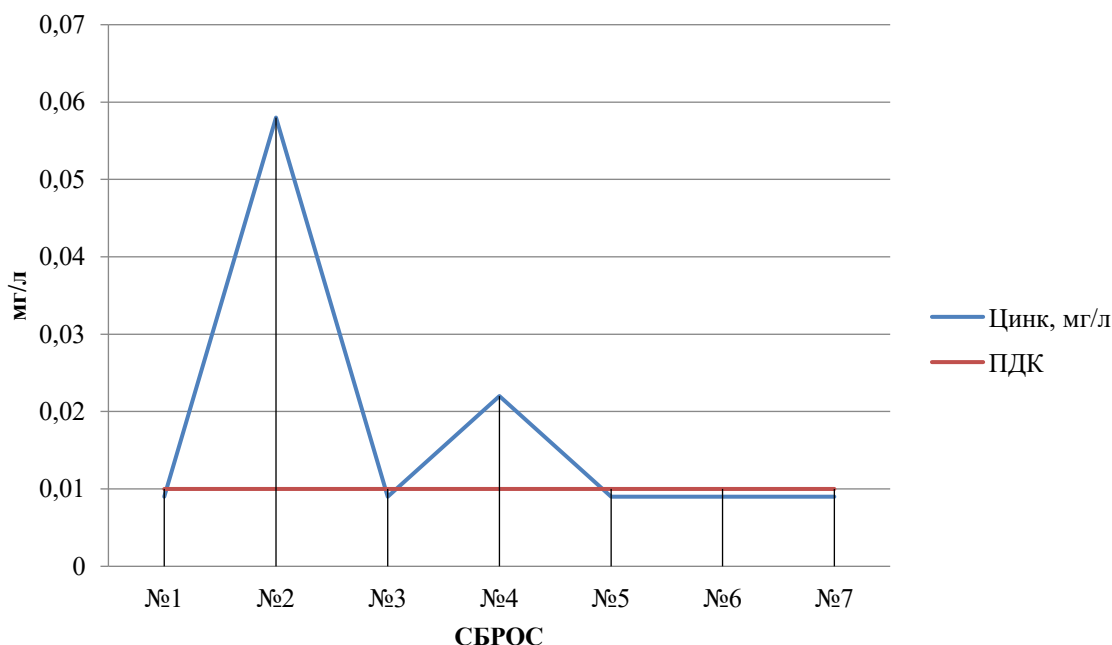


Рис. 1. График результатов исследования показателя цинк в очищенных сточных водах

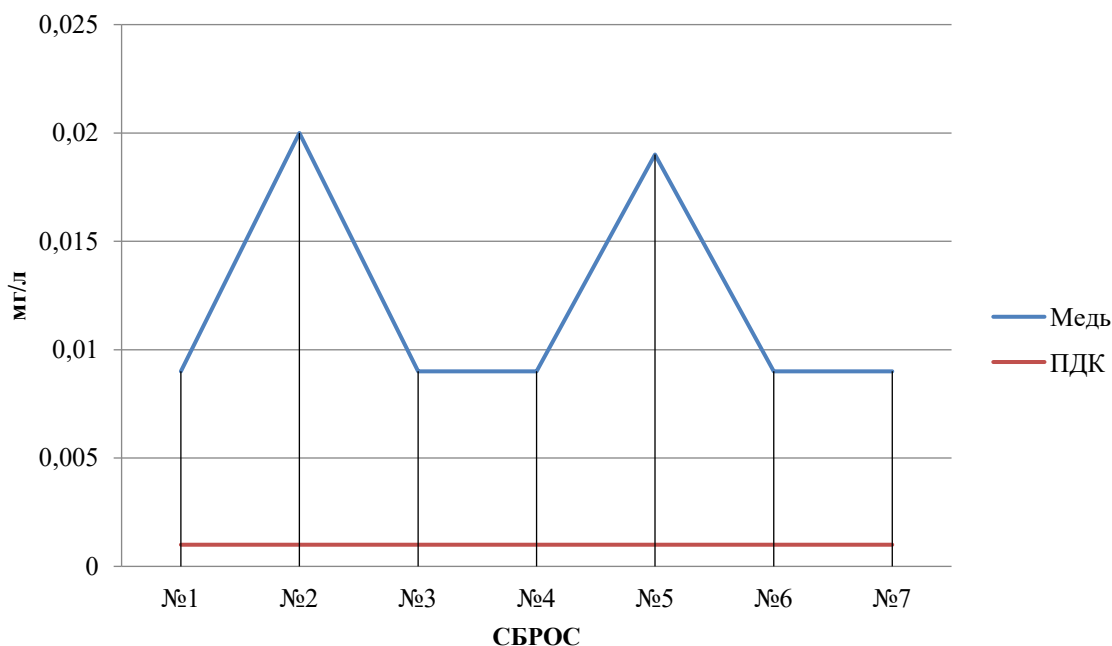


Рис. 2. График результатов исследования показателя медь в очищенных сточных водах

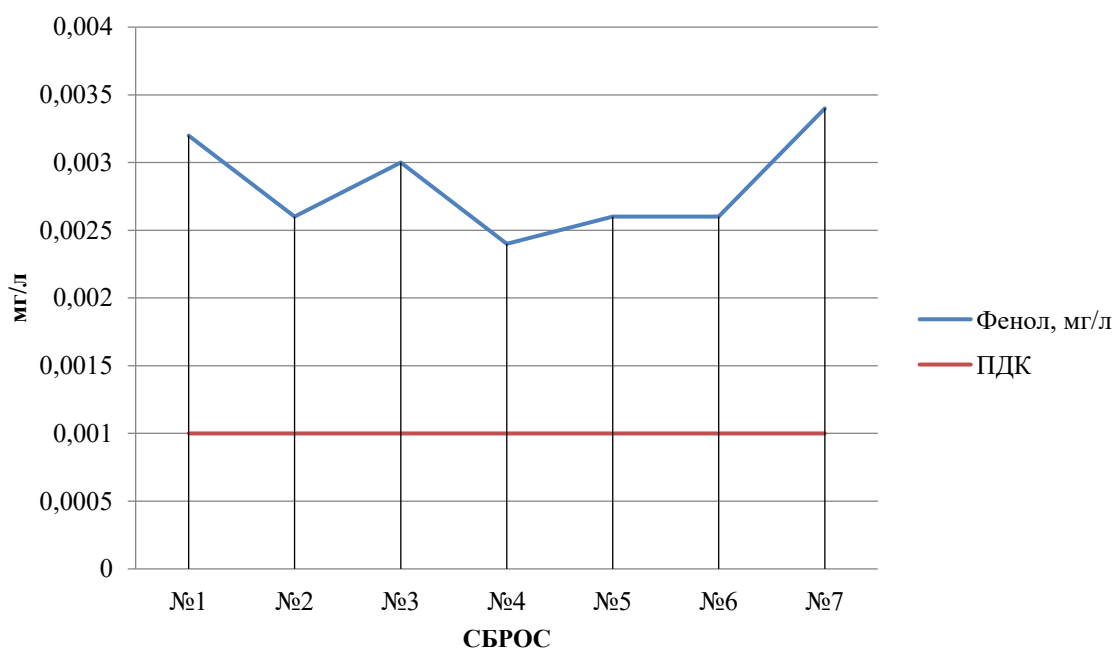


Рис. 3. График результатов исследования показателя фенол в очищенных сточных водах

Результаты химического анализа показали значительные превышения от 3 до 19 ПДК на сбросах 2 и 4. На графиках (рис. 1–3) показаны результаты исследований отобранных проб на наличие цинка, меди, фенола.

Очистка сточных вод от цинка, меди, фенола, железа, нефтепродуктов, сульфат-ион, алюминия, БПК, ХПК – начинается в первичных отстойниках, затем вода проходит фильтрацию и попадает в аэротенки, специальные емкости, где применяются различные реагенты. Для улучшения качества очистки сточных вод необходима корректировка и контроль концентраций реагентов, мониторинг состояния и функциональности фильтров. Хлорид-ион

является вторичным загрязнением, которое образуется в результате дезинфекции очищенных сточных вод. Его концентрация снижается в процессе сброса очищенных сточных вод в водоемы. Обеспечить эффективную работу станций очистки сточных вод, является очень сложной задачей, так как поступающие загрязнители в сточных водах, всегда имеют разную концентрацию, и для корректировки работы станций и подбора нужного количества реагентов необходимо время. Но процесс поступления сточных вод непрерывен, что часто отражается на результатах очистки сточных вод и негативном влиянии на водоемы приемники.

Заключение

Выполнен химический анализ показателей качества очищенных сточных вод: химическое потребление кислорода, биологическое потребление кислорода за 20 дней, железо общее, нефтепродукты, цинк, медь, сульфат-ион, хлорид-ион, алюминий, фенол. Выполнен анализ результатов лабораторных исследований, который показал наличие повышенных концентраций по всем показателям. Превышение допустимых концентраций ХПК зафиксировано на сбросе № 2 до 1.4 ПДК. Железо общее превышено на сбросах № 1–5. Максимальное значение зафиксировано на сбросе № 4 – 5.1 ПДК. Повышенная концентрация нефтепродуктов на сбросе № 7 менее одного ПДК. Концентрации цинка превышают нормы на сбросах № 2 и № 3 максимальное значение до 4.8 ПДК. Концентрации меди превышают допустимые нормы на всех сбросах, максимальные значения доходят до 18 ПДК. ПО сульфат-ион менее одного ПДК зафиксировано на сбросах 1, 2, 4, 6 Превышение хлорид-ион на 1.4 ПДК обнаружено на сбросе № 2. Алюминий превышает нормы на сбросе № 7, где его концентрация составила 4,2 ПДК. Высокие концентрации фенола обнаружены на всех сбросах от 1.6 до 2.4 ПДК. Анализ показал, что сброс № 2 является самым загрязненным. Основной причиной наличия повышенных концентраций загрязняющих веществ в очищенных сточных водах является устаревшее оборудование с высоким физическим износом. Анализ причин, основан на методах гидроэкодиагностики.

Список литературы:

Фонова С.И., Эпиташвили А.В., Лучников Р.А. Работа станций очистки сточных вод в пределах городской застройки, влияние на экологию // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт: Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М., Тамбов, 21–22 сентября 2022 года. Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2022. С. 449–451. EDN LUVDIM.

Эпиташвили А.В., Лучников Р.А., Эпиташвили О.О. Исследование сточных вод после очистки на станции очистки города Липецк // Студент-Наука: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 05–06 декабря 2022 года. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2022. С. 74–76. EDN BBNJDX.

Фонова С.И., Эпиташвили А.В. Исследование водоемов в местах сброса очищенных сточных вод // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: Материалы восьмой научно-практической конференции, Воронеж, 10–13 сентября 2023 года. Воронеж: ООО рекламно-издательская фирма «Кварта», 2023. С. 313–316. EDN RXVZJE.

Фонова С.И., Эпиташвили А.В. Сингулярность процесса экозагрязнений водных объектов // Отходы и ресурсы. 2024. Т. 11. № 4. DOI 10.15862/02NZOR424.

Фонова С.И., Эпиташвили А.В. Особенности инженерно-экологических изысканий при оценке водных объектов в зоне влияния длительно существующих станций очистки сточных вод // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы XIX Общероссийской научно-практической конференции изыскательских

организаций, Москва, 25–29 ноября 2024 года. Москва: Геомаркетинг, 2024. С. 59–63. EDN ELHMF1.

Фонова С. И., Эпиташили А.В., Лучников Р.А. Анализ компонентов техносферы, включающих водоемы и процессы очистки сточных вод // Школа экологических и геологических перспектив: материалы Двенадцатого международного инновационного проекта. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2025. С. 190–193.

УДК: 556.531

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ВОДЫ БАСЕЙНА РЕКИ ЧУЛЬМАН

Чекмарева Д.П., Романюк О.Л., Лавренко Н.Ю.

ФГБУ «Гидрохимический институт», г. Ростов-на-Дону, Россия, zeikan-diana@mail.ru

Аннотация. Изучена динамика изменения концентраций загрязняющих веществ в воде бассейна р. Чульман за многолетний период (2011–2024 гг.) на основе полученных гидрохимических данных Государственной наблюдательной сети (ГНС) Росгидромета в районе воздействия Нерюнгринского угольно-промышленного комплекса. В ходе работы выявлены тенденции загрязненности воды бассейна реки органическими веществами (по ХПК), соединениями железа и меди; дана оценка качества воды р. Чульман и ее притоков (рек Верхняя Нерюнга и Малый Беркакит) за период 2011–2024 гг.

Ключевые слова: р. Чульман, р. Верхняя Нерюнга, р. Малый Беркакит, характерные загрязняющие вещества, тенденция.

В южной части Якутии протекает река Чульман, являющаяся левым притоком р. Тимптон (подбассейн р. Алдан, бассейн р. Лена). На берегах реки расположен город Нерюнгри – крупный административный, промышленный и культурный центр муниципального образования Нерюнгринского района и поселок Чульман, образовавшийся во время строительства Амуро-Якутской магистрали.

Нерюнгринский район относится к промышленному региону Республики Саха (Якутия), где основой промышленности является добыча полезных ископаемых. На протяжении нескольких десятилетий в этом районе идет интенсивная добыча каменного угля, которая в последние годы наращивает обороты⁵⁵ (Калашников, Ковалев, 2022). Предыдущие исследования авторов подтверждают серьезное негативное воздействие горнодобывающей промышленности на окружающую природную среду, в том числе на экосистемы рек, протекающих по территории угледобывающего комплекса (Кузнецова, Чевычелов, 2013; Резник, 2011; Чевычелов, Кузнецова, 2010).

Целью исследования является изучение современной динамики изменения химического состава и качества воды р. Чульман в условиях антропогенного воздействия Нерюнгринского угольно-промышленного комплекса.

Материалы

В качестве материалов были использованы многолетние данные содержания химических веществ в воде р. Чульман, в черте и 0.7 км ниже п. Чульман; р. Верхняя Нерюнга, в черте г. Нерюнгри; р. Малый Беркакит, 0.5 км выше и 0.8 км ниже п. Беркакит, полученные в рамках проведения мониторинга поверхностных водных объектов Росгидромета. В соответствии с РД 52.24.643-2002 (РД 52.24.643-2002..., 2003) оценена динамика качества воды бассейна реки Чульман за период 2011–2024 гг. В качестве нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов применялись рыбохозяйственные значения.

Результаты и обсуждения

Река Чульман берет начало на северных склонах Станового хребта от слияния рек Малый Чульман и Правый Чульман, протекая среди пологих лесистых гор. Далее берега скалистые, обрывистые с каменистыми осыпями. Питание смешанное: за счет весеннего таяния снегов и наледей; но в основном за счет летне-осенних дождей (совмещенных с интенсивным таянием многолетнемерзлотных пород); в меньшей степени грунтовых вод. В районе бассейна реки распространены мерзлотные подзолистые, мерзлотные болотные и

⁵⁵<https://ysia.ru/rost-ugolnoj-promyshlennosti-yakutii-dostizheniya-vyzovy-i-plany-na-budushhee> (дата обращения 3.11.2025 г.).

мерзлотные таежные почвы. Химический состав рек бассейна формируется в сложной природной системе: резко-континентальный климат, многолетняя мерзлота (на некоторых участках Чульманской впадины достигает 100 м), устойчивый снежный покров (до 215 дней в году), болота с высоким содержанием гумусовых веществ и др. (Аржакова и др., 2007).

Также негативно на качестве воды сказывается деятельность предприятий, расположенных вблизи бассейна реки Чульман. Это предприятия энергетики, коммунального хозяйства, водного транспорта, угольной и нефтедобычи – одно из крупных предприятий по добычи угля на Дальнем Востоке АО ХК «Якутуголь»; ПАО «Нерюнгринский городской водоканал»; филиал АО «Дальневосточная генерирующая компания» Нерюнгринской ГРЭС; ООО «Энергорайон Чульман»; филиал Нерюнгринское РНУ ООО «Транснефть-Восток», ООО «Магистраль Беркакит» и др. (Ежегодник..., 2025).

В многолетнем плане характерными загрязняющими веществами воды р. Чульман являлись органические вещества (по ХПК) с повторяемостью случаев превышения 1 ПДК в 60–80% из числа отобранных проб воды. Загрязненность воды соединениями железа и меди варьировала от единичной и неустойчивой до характерной, при повторяемости случаев превышения ПДК 20–80% и 0–100% из числа отобранных проб воды соответственно.

Для воды изученных притоков р. Чульман – Верхняя Нерюнга и Малый Беркакит – характерными загрязняющими веществами были органические вещества (по ХПК), соединения железа и меди.

Среднегодовые концентрации органических веществ (по ХПК) в воде притоков р. Чульман ежегодно превышало допустимые нормативы в 1–2 раза и варьировало в диапазоне от 16.4 до 34.9 мг/л, снижаясь в 2014 г. до 11.4 мг/л (в р. Верхняя Нерюнга, в черте г. Нерюнгри) и в 2015 г. до 12.4 и 13.5 мг/л (в р. Чульман, выше и ниже п. Чульман) (рис. 1).

В створах р. Чульман, в черте и 0.7 км ниже п. Чульман в многолетнем плане отмечена слабо выраженная тенденция к возрастанию органических веществ (по ХПК). Высокие показатели органических веществ в воде рек вероятнее всего вызваны природными факторами (таежные типы почв, многолетнемерзлые породы и др.).



Рис. 1. Изменение среднегодовых концентраций органических веществ (по ХПК) в воде бассейна р. Чульман

В единичных пробах воды реки в отдельные годы фиксировали загрязненность органическими веществами (по БПК₅) – в черте п. Чульман (в 2011–2014, 2022 и 2024 гг.) и 0.7 км ниже п. Чульман (в 2011–2012, 2023–2024 гг.) до 2.08–2.75 мг/л, что может указывать на сброс недостаточно-очищенных стоков.

За многолетний период (2011–2024 гг.) прослеживается четкая тенденция к стабилизации уровня загрязненности воды р. Чульман и ее притока р. Верхняя Нерюнга соединениями железа: среднегодовые концентрации были в пределах 0.04–0.23 мг/л (рис. 2). Содержание соединений железа в воде р. Малый Беркакит было повышенным и в среднем достигало 0.29–0.72 мг/л (уменьшаясь в 2016 г. до 0.13–0.17 мг/л). Повышенное содержания ионов железа может быть связано с высоким содержанием в воде гумусовых веществ (Кузнецова, Чевычелов, 2013; Омелько, Буторина, 2018), попадающих в реки из окружающих болот в период интенсивных дождей и вызываемых ими половодий; вымыванием из железомарганцевых и других руд (Габышева и др., 2023).

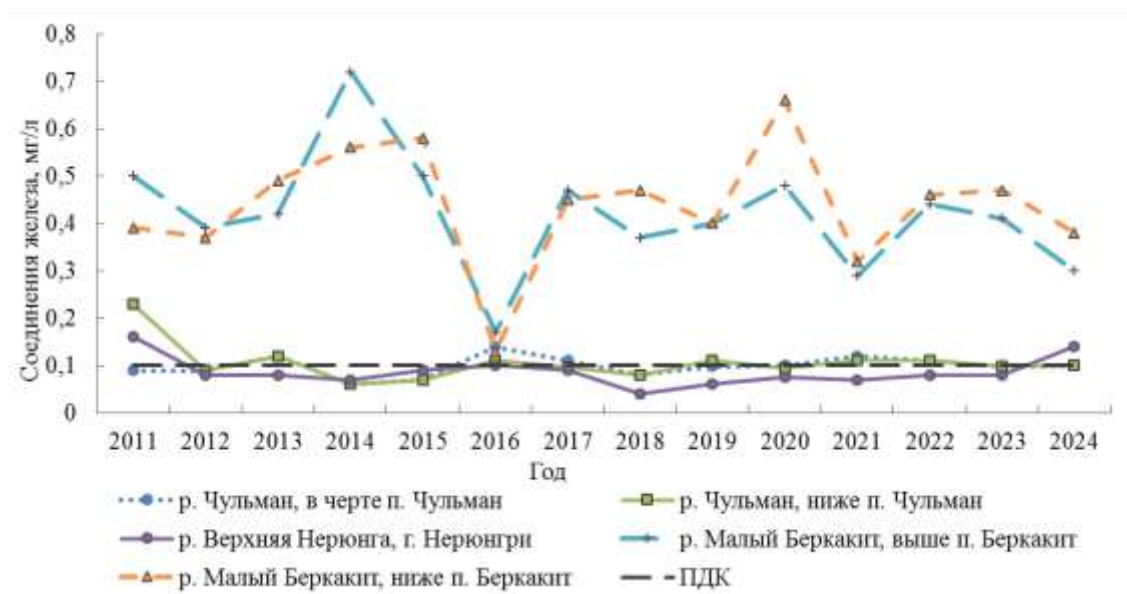


Рис. 2. Изменение среднегодовых концентраций соединений железа в воде бассейна р. Чульман

Соединения меди в течение многолетнего периода присутствовали в воде рек Чульман, Верхняя Нерюнга и Малый Беркакит (рис. 3). С 2012 г. по 2020 г. наблюдалась тенденция повышения среднегодовых концентраций от уровня ниже допустимых (в 2012–2013 гг.) до 2.94–7.12 мкг/л. Далее содержание соединений меди снизилось до 0–0.38 мкг/л в 2021 г., а затем в 2022–2024 гг. стабилизировалось в пределах 0.70–2.03 мкг/л; вероятнее всего этому поспособствовали проводимые мероприятия водоохранных работ на водных объектах в 2021–2024 гг. (в том числе строительство, реконструкция и ремонт очистных сооружений и канализационных сетей, капитальный и текущий ремонт гидротехнических сооружений и др. (Ежегодник..., 2025)).

В отдельные годы в единичных пробах воды рек рассматриваемого бассейна фиксировали загрязненность нитритным азотом и соединениями цинка до 0.04–0.12 мг/л и 10–30 мкг/л соответственно.

В течение многолетнего периода (2011–2024 гг.) вода рек Чульман, Верхняя Нерюнга и Малый Беркакит согласно комплексной оценке качества в основном характеризовалась как «загрязненная»; улучшаясь в 2021 г. в створе в черте п. Чульман и в 2013 г. в створе 0.7 км ниже п. Чульман до «условно чистой», за счет уменьшения концентраций соединений меди ниже установленных нормативов (рис. 3). В некоторые годы изучаемого периода наблюдалось ухудшение качества воды рек до уровня «очень загрязненная»: р. Чульман, в контрольном створе 0.7 км ниже п. Чульман в 2022–2023 гг.; р. Верхняя Нерюнга, в черте г. Нерюнгри в 2011, 2020, 2024 гг.; р. Малый Беркакит, 0.5 км выше п. Баркакит в 2017–2018, 2020–2022 гг.; р. Малый Беркакит, 0.8 км ниже п. Баркакит в 2018, 2020 гг.

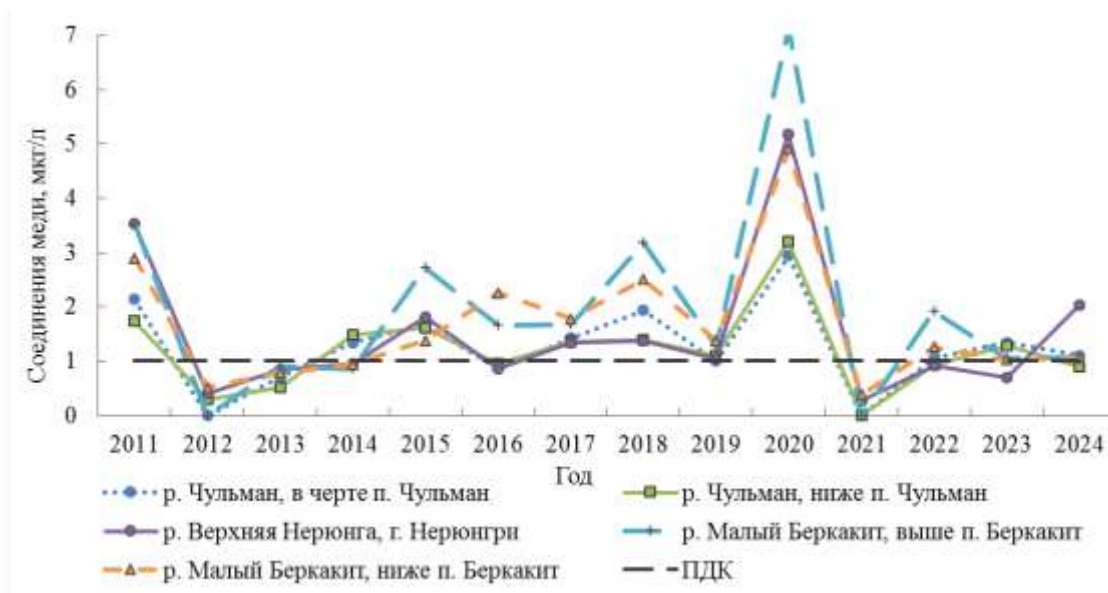


Рис. 3. Изменение среднегодовых концентраций соединений меди в воде бассейна р. Чульман

Выводы

Анализ изменения концентраций загрязняющих веществ в воде р. Чульман и ее притоков (рек Верхняя Нерюнга и Малый Беркакит) за период 2011–2024 гг. показал следующие основные тенденции изменений: слабо выраженную тенденцию к возрастанию содержания органических веществ (по ХПК); стабилизацию содержания соединений железа; неравномерный уровень загрязненности соединениями меди – возрастание с 2012 г. по 2020 г., далее в 2021 г. снижение до уровня ниже ПДК, затем стабилизация.

Согласно комплексной оценке, вода рек Чульман, Верхняя Нерюнга и Малый Беркакит по качеству стабильна и в преобладающем большинстве лет за период 2011–2024 гг. оценивается как «загрязненная».

Полученные результаты подтверждают необходимость дальнейшего исследования текущего уровня загрязнения рек и оценки их экологического состояния в районах с растущей добычей каменного угля. Особое внимание следует уделить мониторингу малых рек, таких как р. Чульман, протекающих в сложных климатических условиях (резко-континентальный климат, многолетняя мерзлота, низкий потенциал самоочищения природных вод), что многократно усиливает последствия антропогенного воздействия.

Список литературы:

- Аржакова С.К., Жирков И.И., Кусатов К.И., Андросов И.М. Реки и озера Якутии. Краткий справочник. Якутск: Бичик, 2007. – 133 с.
- Габышева О.И., Габышев В.А., Якшина И.А. Химический состав вод крупных рек Восточной Сибири и его зависимость от мощности слоя сезонного протаивания почв на водосборах // Криосфера Земли. – 2023. – Т. 27, № 2. – С. 16-24. – DOI 10.15372/KZ20230202.
- Ежегодник качества поверхностных вод и эффективности проведенных водоохранных мероприятий на территории деятельности ФГБУ «Якутское УГМС» за 2024 г. - Якутск, 2025.
- Калашников В.В., Ковалев Л.Н. Геологические работы в Республике Саха (Якутия) за 100 лет // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 6-24. – DOI 10.47765/0869-5997-2022-10007.
- Кузнецова Л.И., Чевычелов А.П. Изменение химического состава и свойств поверхностных вод в ходе промышленного освоения территории Южной Якутии // Апробация. – 2013. – № 10(13). – С. 100-103.

Омелько С.А., Буторина Т.Е. Исследование грунта рек Чульман и Унгра (Южная Якутия) на содержание тяжелых металлов // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли: Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Владивосток, 30 ноября 2018 года. – Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2018. – С. 99-101.

РД 52.24.643-2002. «Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2003. – 49 с.

Резник И.В. Экологическое состояние рек Унгра и Чульман (бассейн реки Алдан, Южная Якутия): специальность 03.02.04 "Зоология": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Резник Инна Вячеславовна. – Владивосток, 2011. – 22 с.

Чевычелов А.П., Кузнецова Л.И. Изменение химического состава поверхностных вод р. Чульман и ее притоков в районах угледобычи // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37, № 5. – С. 612-616.

УДК 504.4.054:665.7(282.257.21)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ВОДЕ РЕКИ КАМЧАТКА В 2005-2024 гг.

Чепурная Т.А., Ермакович Е.А.

ФГБУ «Гидрохимический институт», г. Ростов-на-Дону, Россия, *chepurnaya.t@inbox.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты многолетнего (2005–2024 гг.) мониторинга одного из основных загрязняющих веществ реки Камчатка – нефтепродуктов. Исследование выявило загрязнение водной среды в среднем и нижнем течении реки, где регулярно фиксировались превышения ПДК, а также были зарегистрированы случаи высокого и экстремально высокого загрязнения.

Ключевые слова: река Камчатка, качество воды, нефтепродукты, мониторинг загрязнения, динамика концентраций, ПДК.

Загрязнение водных объектов нефтепродуктами является глобальной проблемой, обусловленной как масштабами добычи и потребления нефти, так и природными факторами (сейсмическая и вулканическая активность в нефтегазоносных регионах). Присутствие нефтяных углеводородов в питьевой воде представляет серьезную угрозу для здоровья человека, повышая риски острых интоксикаций, аллергических заболеваний, патологий сердечно-сосудистой, эндокринной и нервной систем (Блоков, Васильева, 2024).

Особую актуальность контроль содержания нефтепродуктов приобретает для водоемов рыбохозяйственного назначения, выполняющих функции нерестилищ и мест нагула молодых ценных пород рыб. Ярким примером служит река Камчатка, в бассейне которой воспроизводятся популяции тихоокеанских лососей (чавычи, нерки, кижуча, кеты, горбуши), сельди, а также обитают осетр, хариус и голец. Помимо естественных геологических процессов, ключевым антропогенным источником загрязнения реки нефтепродуктами является проведение буровых работ при разведке месторождений и последующая ликвидация скважин.

В рамках государственной сети наблюдений Росгидромета качество воды реки Камчатка отслеживается по всей ее протяженности в 4-х пунктах (5 створов) с ежегодной частотой отбора проб от 7 до 12 раз.

Особо выделяется в части загрязнения нефтепродуктами качество воды в пункте мониторинга, расположенном в 248 м от устья, в черте пгт Козыревск. Характерной особенностью данного участка в среднем течении реки является широкая (18–20 км) трапецеидальная долина с равнинным рельефом и левобережной заболоченной поймой шириной 5 км. Русло реки здесь значительно расширяется до 240–250 м в межень, отличается разветвленностью, извилистостью и сложным строением берегов: высокий (7–8 м) обрывистый правый берег контрастирует с более пологим левым.

Качество воды в районе пгт Козыревск в 2005–2024 гг. изменялось от 4-го класса разряда «б» «грязная» до 3-го класса разряда «а» «загрязненная» (рис. 1). При этом динамика концентраций нефтепродуктов в этом створе существенно отличается от показателей, наблюдаемых в верховье реки, где качество воды преимущественно оценивалось 2-м классом «слабо загрязненная» (Ежегодник, 2024).

Токсическое воздействие нефтепродуктов на гидробионты, включая рыб, наблюдается уже при концентрациях 0.01–0.10 мг/л. Это выражается в нарушениях физиологических функций, поведения и процессов питания. Патогенез интоксикации включает поражение центральной нервной системы, угнетение двигательной и иммунной активности, патологии пищеварительного тракта и отклонения в поведенческих реакциях (Кленкин, Корпакова,

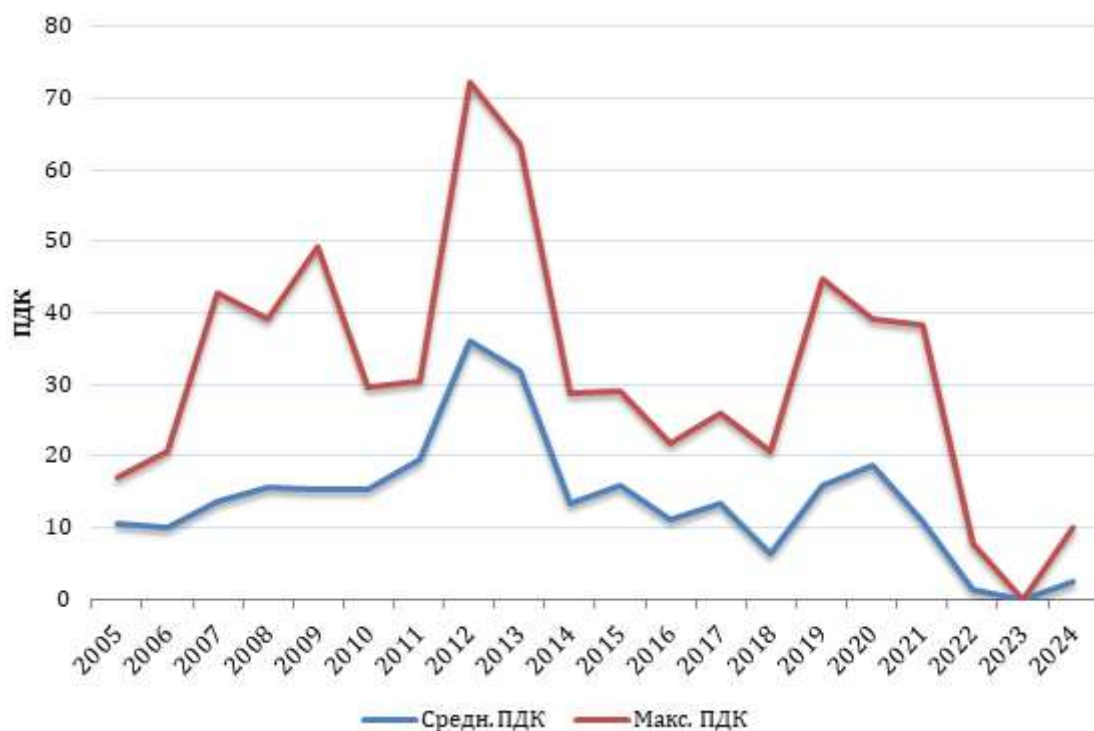


Рис. 1. Содержание нефтепродуктов в воде р. Камчатка (пгт Козыревск, в черте пгт), ПДК

2007). Особую уязвимость демонстрирует молодь рыб, у которой нефтяное загрязнение может вызывать глубокие органические поражения нервной системы. Это проявляется в подавлении аминокислотного и энергетического обмена в тканях мозга, что влечет за собой уменьшение его объема. Следствием снижения интенсивности питания молоди на фоне интоксикации является замедление темпов роста массы тела.

Анализ данных за 2005–2024 гг. для пункта наблюдений в пгт Козыревск выявил многочисленные случаи значительного загрязнения воды нефтепродуктами. За указанный период было зарегистрировано 12 эпизодов высокого загрязнения (ВЗ) с концентрациями от 1.52 до 2.46 мг/л (30–49 ПДК), а также 3 случая экстремально высокого загрязнения (ЭВЗ) в 2012–2013 гг., когда показатели достигали 54–72 ПДК или 2.69–3.61 мг/л (Чепурная, 2025).

Важно отметить, что токсический эффект нефтепродуктов усиливается при их совместном присутствии в воде с другими загрязняющими веществами. Следствием воздействия высоких концентраций тяжелых металлов является накопление их в гидробионтах, что приводит к нарушению процессов метаболизма и патологическим изменениям на всех уровнях строения и функционирования организма. Для рыб с большой продолжительностью жизни загрязнение оказывает более значительное влияние, чем на короткоциклические виды, потому что интегральное воздействие токсикантов из среды обитания и аккумуляция их в различных тканях происходит на протяжении всей жизни.

На основании результатов исследования, полученных государственной сетью наблюдений Росгидромета за 2005–2024 гг., проведен анализ изменения содержания тяжелых металлов и фенолов в воде в среднем течении р. Камчатка (рис. 2).

Критического уровня загрязненности воды наряду с нефтепродуктами достигали соединения кадмия и цинка в 2006–2007 гг., среднегодовые концентрация которых находились на уровне 3–6 ПДК, а также соединения меди в 2011 г. (10 ПДК).



Рис. 2. Содержание загрязняющих веществ в воде р. Камчатка (пгт Козыревск, в черте пгт), ПДК

Важным результатом мониторинга является выявление позитивной тенденции в последние годы. В период 2021–2024 гг. зафиксировано трехкратное снижение среднегодовых концентраций нефтепродуктов – до уровня 0–2 ПДК, при этом случаи ВЗ и ЭВЗ отсутствовали. Основным фактором, обуславливающим наблюдаемое снижение, по-видимому, являются природные механизмы самоочищения водной экосистемы, включающие процессы естественной деструкции, химического окисления и биodeградации с участием микроорганизмов.

Список литературы:

- Блоков И.П., Васильева Е.А. Загрязнение нефтепродуктами реки Камчатки // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 1. С. 33–44.
- Ежегодник. «Качество поверхностных вод Российской Федерации» / под ред. М. М. Трофимчука. Ростов-на-Дону: ФГБУ «Гидрохимический Институт», 2024. 594 с.
- Кленкин А.А., И.Г. Корпакова И.Г., Павленко Л.Ф., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар, 2007. 324 с.
- Чепурная Т.А., Ермакович Е.А., Романюк О.Л. Динамика содержания нефтепродуктов в воде реки Камчатка // Сборник статей, посвященный 105-летию со дня образования Гидрохимического института, «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». Ростов-на-Дону, 2025. С. 91–97.

УДК 556.531.4

ТРАНСФОРМАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД СРЕДНЕГО АМУРА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Шестеркин В.П.

ХФИЦ Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, Россия,
shesterkin@ivep.as.khb.ru

Аннотация. Рассмотрено изменение химического состава воды среднего Амура. Установлено влияние Зейского и Бурейского водохранилищ на химический состав воды верхней части среднего Амура и хозяйственной деятельности на китайской территории – нижней части.

Ключевые слова: средний Амур, зимняя межень, минерализация, химический состав.

Средний Амур – участок Амура между г. Благовещенск и г. Хабаровск протяженностью 980 км, химический состав вод которого формируется в основном водами верхнего Амура, рек Зея, Буря, Сунгари и Уссури. Среди притоков Амура р. Сунгари наиболее крупная (длина 1865 км, площадь водосбора 526.1 тыс. км²), дренирует северо-восточный Китай. В последние 60 лет в бассейне р. Сунгари появились заводы по производству минеральных удобрений и бумаги, на многие сотни километров протянулись каналы рисовых чеков. Численность населения в провинциях Цзилинь и Хэйлунцзян в 2015 г. превысила 65 млн человек. В то же время в российской части бассейна Амура закрылись гидролизные и биохимические заводы в городах Хор и Лесозаводск, сбрасывающих до 274 т аммонийного азота (Состояние..., 1994). Поэтому экономические преобразования на этом участке Амура, прежде всего в Китае не могли не оказать влияния на химический состав его вод.

Зимняя межень р. Амур у Хабаровска характеризуется широкой амплитудой колебаний водного стока вследствие зарегулирования рр. Зея, Буря и Сунгари. В 1999–2025 гг. наименьшие уровни воды (от -109 до -234 см) за счет низких расходов воды Зейского и Бурейского водохранилищ (суммарно изменялись от 600 до 1538 м³/с, в среднем составляли 1155 м³/с) отмечались в 2001–2009, 2015–2016 и 2018–2019 гг. Максимальная водность наблюдалась в 2013 и 2022 гг., когда уровни воды превышали -9 и +22 см соответственно.

Гидрохимическая изученность среднего Амура низкая. Наблюдения Росгидромета осуществляются в Хабаровске и в левобережной части г. Благовещенск. В районе с. Ленинское (ниже устья р. Сунгари) исследования проводили в марте 1998, 2000–2002 гг. на 3-х равномерно распределенных от левобережной части русла до гос. границы пунктах. После аварии на химическом комбинате в г. Цзилинь (КНР) в 2005 г. наблюдения осуществляли на 3-х равномерно распределенных по ширине Амура пунктах у с. Амурзет и Фуюань (2006); с. Ленинское (2006, 2011–2012). В г. Хабаровск исследования проводили в декабре-марте 1996–2025 гг. ежемесячно на пяти расположенных равномерно по ширине Амура пунктах. Анализ проб воды осуществляли в ЦКП при ИВЭП ДВО РАН.

Максимальная минерализация вод среднего Амура наблюдается у г. Благовещенск. В марте 2001 г. она составляла 223 мг/дм³, 2002 г. – 180 мг/дм³. Вода характеризовалась низким содержанием аммонийного азота и цветностью.

Ниже устья р. Зея в химическом составе вод Амура происходят большие изменения из-за зарегулирования в 1975 г. Повышение водности Зеи (расходы воды достигали 1500 м³/с) обусловило преобладание стока этой реки в стоке среднего Амура. Поступление ультрапресных вод Зеи, характеризующихся низким содержанием солей и повышенной концентрацией органических веществ снизило минерализацию вод Амура до 49 мг/дм³ и повысило ее цветность в среднем до 120° (Шестеркин, 2015).

Большое влияние на содержание растворенных веществ оказало зарегулирование р. Буря в 2003 г. В зимнюю межень 2010–2020 гг. расходы этой реки возросли в среднем в 1.6

раза по сравнению с 2005–2007 гг., в 2019–2021 гг. достигли максимального значения (835 м³/с). В 2005–2007 гг. суммарные расходы воды рр. Зея и Буря ниже ГЭС в среднем составляли 1219 м³/с, в 2012–2013 гг. – 1978 м³/с, после наводнения 2013 г. – 2161 м³/с (Шестеркин и др., 2014). Повышение стока с низкой величиной минерализации обусловило снижение содержания солей до 38 мг/дм³ (самого низкого значения на среднем Амуре) в воде у с. Амурзет (400 км от Хабаровска). Снизилось содержание аммонийного и нитратного азота в 1.7 и 1.3 раза соответственно, цветности воды – в 1.8 раза.

Значительное влияние на химический состав воды оказывает р. Сунгари, дренирующая наиболее населенную и освоенную часть бассейна Амура. Вода этого правобережного притока выделяется повышенным содержанием солей (до 200 мг/дм³), минеральных форм азота и фосфора (Шестеркин, Шестеркина, 2009). Поэтому у с. Ленинское (240 км от Хабаровска) в китайской части Амура резко возрастает содержание солей. Минерализация воды в р. Амур возрастает в среднем до 90–100 мг/дм³, содержание сульфатных и хлоридных ионов – в 8 и 4 раза соответственно, нитратного и аммонийного азота – в 2.5 и 2.3 раза. Цветность воды и содержание железа снижаются в 1.5 и 1.4 раза соответственно. Максимальные различия в значениях минерализации воды между китайским и российскими частями русла отмечались в феврале 2012 г. (161 мг/дм³), а минимальные – марте 2011 г. (69 мг/дм³). Наибольшие различия в содержании ионов отмечались для хлоридного (15 раз) в феврале 2012 г. и сульфатного ионов (9 раз) в декабре 2005 г. после аварии на химическом комбинате г. Цзилинь (Шестеркин и др., 2007).

Ниже по течению различия в распределении растворенных веществ по ширине Амура постепенно сглаживаются. В марте 2006 г. минерализация амурской воды у г. Фуюань изменялась от 55.3 до 82.2 мг/дм³, у с. Нижнеспасское – 60.0–81.4 мг/дм³, была в 1.8 раза выше, чем на верхнем участке среднего Амура. Содержание сульфатов и хлоридов возрастало в среднем в 2.4 и 3.2 раза, нитратного и аммонийного азота в 1.9 и 2.9 раза соответственно. Цветность воды снизилась в 1.4 раза.

Минерализация воды р. Амур у г. Хабаровск в 2017–2025 гг. изменялась от 49.0 до 143.7 мг/дм³. В левобережной части она находилась в пределах 49.0–73.6 мг/дм³, на середине реки – 88.6–147.0 мг/дм³, в правобережной части – 87.8–125.2 мг/дм³. Максимальное значение (185.5 мг/дм³) отмечалось в декабре 1998 г. после исторического наводнения в бассейне р. Сунгари. Наибольшее различие в значениях по ширине реки отмечалось в многоводном 2017 г. (69.1 мг/дм³), наименьшее – в маловодном 2018 г. (24.6 мг/дм³). На середине и в левобережной части русла реки вследствие зарегулирования наблюдалось снижение минерализации. Средние за зиму значения изменялись от 82.7 до 113 мг/дм³, максимум фиксировался в 2021 г.

Средняя за период наблюдений минерализация воды в правобережной части составила 95.8, на середине – 102.7, в левобережной части – 82.2 мг/дм³. Среднее значение минерализации составило 96.7 мг/дм³, по сравнению с 1950–1967 гг. снизилось в 1.3 раза.

Большие изменения произошли и в содержании аммонийного азота, которое в 2023–2024 гг. выделялось небольшим межгодовым варьированием значений, снижением среднего значения (до 0.1 мг N/дм³), т.е. в 8.4 раза более низкого, чем в 1975–1988 гг. Незначительное загрязнение вод Амура отмечалось лишь на середине реки в феврале 2015 г. (1.1 ПДК), в январе 2025 г. максимальное значение достигало 0.36 ПДК. Наименьшая концентрация отмечалась в феврале 2021 г. (0.08 мг N/дм³) и 2023 г. (0.05 мг N/дм³) в левобережной части.

Наибольшие различия в содержании аммонийного азота по ширине Амура у Хабаровска отмечались в 2014–2015 гг. (0.40 мг N/дм³), наименьшие – в 2024 гг. (0.04 мг N/дм³). Максимальные концентрации в основном наблюдались на середине реки, наименьшие – в левобережной части. Такие отличия в концентрациях по ширине реки обусловлены различным их содержанием в воде основных его притоков: в правобережной части Амура отчетливо проявляется влияние вод р. Уссури, на середине – вод р. Сунгари, в левобережной части – вод рр. Зея и Буря.

Такое снижение концентрации аммонийного азота в воде среднего Амура могло быть связано с проведением природоохранных мероприятий в бассейне р. Сунгари после аварии на химическом комбинате г. Цилинь в конце 2005 г. Улучшению качества вод р. Сунгари способствовало закрытие некоторых и модернизация изношенных очистных сооружений. На сток этого вещества повлияло и закрытие предприятий микробиологической промышленности в бассейне р. Усури.

Зарегулирование рек Зeya и Бурея обусловило в верхней части среднего Амура снижение минерализации воды, концентрации биогенных веществ и повышение органического вещества. Воды р. Сунгари, характеризующиеся повышенным содержанием главных ионов и минеральных форм азота, в наибольшей степени проявляется в нижней части среднего Амура.

Природоохранные мероприятия в бассейне р. Сунгари после аварии в г. Цилинь в 2005 г., гидротехническое строительство и прекращение деятельности предприятий микробиологической промышленности в российской части бассейна Амура обусловили снижение концентрации аммонийного азота в амурской воде у Хабаровска в зимнюю межень. В 2023–2024 гг. по сравнению с 1975–1988 гг. содержание аммонийного азота снизилось в 8.4 раз, редким стало загрязнение вод Амура этим веществом.

Список литературы:

Состояние природной среды и природоохранная деятельность в Хабаровском крае в 1993 году: Доклад комитета экологии и природных ресурсов Хабаровского края. 1994. 123 с.

Шестеркин В.П. Солевой состав вод Зейского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 5. С. 32–42.

Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Особенности качества воды р. Сунгари // Геоэкология, инженерная экология, гидрогеология, геоэкология. 2009. № 1. С. 50–53.

Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Многолетняя динамика содержания и стока аммонийного азота в воде среднего Амура // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 2. С. 33–41.

Шестеркин В.П., Сиротский С.Е., Шестеркина Н.М. Воздействие гидроэнергетического строительства на содержание и сток растворенных веществ в воде реки Бурея // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 4. С. 72–83.

Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М., Фокина Ю.А., Ри Т.Д. Трансграничное загрязнение Амура в зимнюю межень 2005–2006 гг. // География и природные ресурсы. 2007. № 2. С. 40–44.

РЕШЕНИЕ

Всероссийской научной конференции с международным участием «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В НАСТОЯЩЕМ, ПРОШЛОМ И БУДУЩЕМ» 13–15 мая 2026 г., г. Москва

Участники конференции, посвященной 120-летию выдающегося советского гидролога Марка Исааковича Львовича, констатируют актуальность географо-гидрологических исследований. Заслушанные на конференции доклады вносят несомненный вклад в развитие этих исследований и заслуживают внимания организаций и лиц, принимающих решения в области гидрологических и водохозяйственных расчетов, планов и проектов.

Вместе с тем, выявлен целый ряд проблем, требующих скорейшего решения. Среди них:

- Получение достоверных исходных метеорологических, гидрологических, гидрохимических, водохозяйственных данных. Организация дополнительных наблюдений на репрезентативных постах и станциях, в том числе воднобалансовых, за показателями, оказывающими негативное влияние на здоровье человека и экологическое состояние водных объектов (микроэлементами в растворенной форме, на взвешенных наносах и в донных отложениях в малых концентрациях и других), на основе внедрения современных методов измерения – их автоматизации, использования спутниковой информации и т.д. Участники конференции с глубокой обеспокоенностью констатируют сложившееся в настоящее время неблагоприятное положение в получении гидрометеорологической и водохозяйственной информации.
- Совершенствование методов расчета и прогнозирования гидрологических и гидроэкологических процессов и явлений (в первую очередь, экстремальных), особенно на региональном уровне, на основе географо-гидрологических подходов, физико-математического моделирования водного и гидрохимического баланса территории с учетом меняющейся ландшафтной структуры, взаимосвязи поверхностных и подземных вод, антропогенной нагрузки.

Первостепенного внимания заслуживают следующие направления исследований:

- Оценка произошедших и вероятных в будущем изменений стока, других составляющих водного баланса, в том числе испарения с учетом трансформации биологической продуктивности наиболее распространенных ландшафтов, особенно лесных и сельскохозяйственных; с особым вниманием к долговременным периодам повышенного/пониженного стока и частоты маловодных и многоводных лет;
- Развитие методов сценарного прогнозирования изменений речного стока в условиях глобального потепления, основанных на гидрологическом моделировании, глобальных климатических моделях, результатах анализа многолетних изменений стока и его факторов, учитывающих региональные особенности географо-гидрологических условий с особым вниманием к бассейнам Каспийского моря, Дона, Байкала, рек в районах распространения многолетней мерзлоты.

- Оценка современного и ожидаемого в будущем под влиянием комплекса климатических и антропогенных факторов водохозяйственного баланса России и мира.
- Выявление вклада различных источников загрязнения рек и водоемов, в том числе диффузного стока с водосборов, сточных и возвратных вод, включая содержащиеся в них лекарственные препараты, микровзвеси (микрочастицы) в комплексе с переносимыми ими загрязняющими веществами, редкоземельные элементы. Для снижения потоков загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты с водосборов, целесообразно применять комплекс природоподобных технологий, в частности мульчирование почвы растительными остатками, значительно снижающими эрозию и улучшающими плодородие почвы, агрофизические и агрохимические ее показатели.
- Оценка негативного воздействия крупных гидротехнических объектов на прилегающие территории, здания и сооружения в пределах 4–6 км от плотины. Необходимо разработать меры по предотвращению их разрушения и обеспечению комфортного проживания населения в зоне наиболее интенсивного вибрационного воздействия.
- Оценка последствий возможной переброски части стока северных европейских и сибирских рек для решения водных проблем южных районов, в том числе по трубопроводам большого размера.
- Изыскание путей наиболее рационального, экологически безопасного решения водохозяйственных проблем, особенно в дефицитных по воде южных районах России, в том числе в Каспийском регионе. Важной составляющей частью такого решения является совершенствование системы ПДК с учетом региональных особенностей природных фоновых характеристик и нормирование количественного изъятия водных ресурсов на основе учета экологического стока, методы оценки которого требуют развития.

Прилагаемые на протяжении десятилетий усилия по ослаблению последствий негативных воздействий морских вод на прибрежную инфраструктуру Каспийского моря на основе долгосрочных прогнозов его уровня не привели к положительным результатам в связи с ошибочно выбранной стратегией землепользования. Позитивные тенденции могут быть достигнуты за счет адаптации хозяйственной системы прибрежной зоны к природным особенностям изолированного водного бассейна.

Следует признать недопустимой ликвидацию созданной в течение десятилетий системы водоохранных зон, прибрежных защитных полос и зон санитарной охраны водных объектов. Сложившаяся ситуация с массовой застройкой прибрежных зон, периодически подвергающихся затоплениям во время половодий и паводков, создала реальную угрозу лишения будущих поколений россиян водных ресурсов не только для питьевого, но и для рекреационного использования.

Конференция рекомендует:

- **Росгидромету** расширить сеть гидрометеорологических станций и постов, в том числе воднобалансовых, оснастить их современным оборудованием, модернизировать программу наблюдений. Восстановить для научных и образовательных организаций бесплатный доступ к

АИС ГМВО, portalу gis.vodinfo.ru и данным метеостанций на meteo.ru (не менее чем в объеме, существовавшем до 2022 года).

– **Федеральной службе государственной статистики (Росстату)** обеспечить открытый бесплатный доступ для научных и образовательных организаций к статистической информации, необходимой для оценки антропогенной нагрузки на речные водосборы, включая данные о населении, сельском хозяйстве (поголовье скота, внесение удобрений, урожайность), лесном хозяйстве (лесистость, рубки, пожары), промышленности и землепользовании. Без привязки этих данных к бассейновой структуре и без их открытости любые научные исследования по оценке антропогенного эвтрофирования, загрязнения и изменения стока не могут служить надежной основой для управленческих решений.

– **Профильным вузам** (МГУ, РГГМУ, СПбГУ, КФУ и др.) усилить подготовку гидрологов по географо-гидрологическому направлению, включая современные методы ДЗЗ, численного моделирования, машинного обучения и полевые практики на воднобалансовых станциях.

Участники конференции поручают Оргкомитету направить настоящий проект решения в Правительство РФ, Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет, Росстат, Российскую академию наук, а также в профильные комитеты Государственной Думы.

Научное издание

Водные ресурсы в настоящем, прошлом и будущем

Ответственный редактор **Коронкевич** Николай Иванович

Редакторы:

Кашутина Екатерина Александровна

Сидорова Мария Владимировна

Барабанова Елена Алексеевна

Гришанцева Елена Сергеевна

Верстка *Е. А. Барабанова, Е. С. Гришанцева*

Формат 210×297 мм

Электронное издание

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт географии Российской академии наук

119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4